



КАЦАДЗЕ Т. Л.

**ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ
РОЗРАХУНКІВ
ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Т. Л. Кацадзе

ОСНОВИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Підручник

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як підручник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

УДК 621.315.1 (075.8)

К31

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 8.04.2019 р.)*

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, д-р техн. наук, проф.,
Вінницький Національний технічний університет

Ю. І. Тугай, д-р техн. наук, проф.,
Інститут електродинаміки НАНУ

Відповідальний редактор

В. В. Кирик, д-р. техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кацадзе Т. Л.

К31 Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання: Підручник / Т. Л. Кацадзе. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 333 с.

ISBN 978-966-622-953-6

Розкрито основні положення конструктивно-механічної частини повітряної лінії електропередавання: конструкції проводів, опор, ізоляційних підвісів, грозозахисних тросів, лінійної арматури; умов експлуатації повітряних ліній, кліматичні навантаження та впливи, які зазнають конструктивні елементи ліній; теорії механічних розрахунків конструктивних елементів повітряних ліній за методами руйнівних навантажень, допустимих напружень та граничних станів; проектного розташування опор вздовж траси повітряної лінії; методи розрахунків багатопробіжних ділянок в нормальних, аварійних та монтажних режимах відповідно до вимог чинних нормативних документів. Наведено приклади механічних розрахунків та додатки із довідниковими матеріалами.

Для студентів усіх форм навчання та студентів-іноземців спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Може бути корисним для інженерів, які працюють в області проектування, будівництва та обслуговування повітряних ліній електропередавання.

УДК 621.315.1 (075.8)

ISBN 978-966-622-953-6

© Т. Л. Кацадзе, 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ФЕА), 2019

ПЕРЕДМОВА

Передача та розподіл електричної енергії здійснюється, в основному, за допомогою повітряних ліній електропередавання, механічна міцність яких обумовлює надійність та безперебійність електропостачання споживачів. Задачі механічних розрахунків конструктивних елементів повітряних ліній розв'язують, зазвичай, на етапі проектування ліній електропередавання, але не менш важливо виконувати такі розрахунки під час експлуатації лінії.

Сучасні тенденції в області електромережевого будівництва, направлені на відмову від типових рішень та адаптацію конструкцій до конкретних умов траси лінії, використання новітніх матеріалів та технологій вимагають відповідної підготовки спеціалістів в області проектування та експлуатації електричних мереж.

Зміст підручника «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» відповідає навчальній програмі дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Ця дисципліна є однією з базових, належить до циклу професійної та практичної підготовки і закладає фундамент для спеціальної підготовки спеціалістів в галузі передачі та розподілу електричної енергії.

Теоретичною та методологічною основою дисципліни є знання, набуті студентами під час вивчення дисциплін циклів математичної, природничо-наукової та професійної і практичної підготовки: «Вища математика», «Фізика», «Теоретична механіка», «Прикладна механіка», «Технологія конструкційних матеріалів». Своєю чергою, дисципліна є базовою для вивчення таких дисциплін: «Електричні системи та мережі», «Регулювання режимів електричних систем», «Надійність та проектування електричних систем».

Задачею вивчення дисципліни є глибоке оволодіння студентами знаннями про фізику процесів в конструктивних елементах повітряних ліній, обумовлених зміною кліматичних навантажень та впливів в процесі експлуатації. Технологічне спрямування дисципліни дозволяє озброїти спеціаліста сучасними математичними засобами аналізу та синтезу структур конструкційних елементів повітряних ліній електропередавання, розрахунку кліматичних навантажень та впливів на елементи повітряної лінії, знаннями новітніх засобів та способів проектування повітряних ліній. Практичне спрямування дисципліни «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання» зорієнтоване на прищеплення студентам умінь та навичок інженера-технолога, експлуатаційника, проектувальника і конструктора, які відповідають їх виробничим функціям, здатним

приймати самостійні творчі рішення під час проектування, конструювання і налагодження устаткування повітряних ліній.

Матеріал підручника базується на лекційних курсах «Основи проектування механічної частини ЛЕП» та «Основи механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання», які автор читає студентам кафедри електричних мереж та систем КПП ім. Ігоря Сікорського протягом 20 років. Під час викладення матеріалу автор використовував логічний розвиток теорії механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання з метою донести до студента фундаментальні знання, які знадобляться в його подальшій професійній діяльності. Водночас викладення матеріалу підручника базується на чинних нормативах щодо конструктивного виконання повітряних ліній електропередавання.

Підручник проілюстровано великою кількістю прикладів розв'язання практичних задач в програмному середовищі Mathcad Prime, які допоможуть ефективніше сприйняти викладений теоретичний матеріал. Наприкінці кожного підрозділу підручника наведено питання для самоконтролю та списки посилань на спеціальну та навчальну літературу. Наприкінці підручника міститься предметний покажчик та глосарій, в яких наведено основні поняття в області механіки повітряних ліній електропередавання, які використано в тексті підручника.

Автор висловлює щире подяку рецензентам доктору технічних наук, професору Лежнюку П. Д. та доктору технічних наук, професору Тугаю Ю. І., а також колективу кафедри електричних мереж та систем КПП ім. Ігоря Сікорського за ретельний аналіз тексту підручника, цінні зауваження та рекомендації щодо викладення матеріалу.

Відгуки, зауваження та побажання щодо підручника автор просить надсилати на адресу: м. Київ, пр. Перемоги, 37, КПП ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем.

СКОРОЧЕННЯ ТА ПОЗНАЧЕННЯ

| | |
|------|--|
| ВОЛЗ | Волоконно-оптична лінія зв'язку |
| ЛЕП | Лінія електропередавання |
| ПЛ | Повітряна лінія (електропередавання) |
| ПЛЗП | Повітряна лінія (електропередавання) із захищеними проводами |
| ПУЕ | Правила улаштування електроустановок |
| САПР | Система автоматизованого проектування |
| СІП | Самоутримний ізолюваний провід |

| | |
|-------------------|--|
| C_x | Аеродинамічний коефіцієнт |
| E | Модуль пружності |
| F | Розрахунковий переріз проводу |
| G_r | Вага ізоляційного підвісу |
| H | Горизонтальна складова тяжіння проводу |
| H_0 | Тяжіння проводу у вихідному режимі |
| L | Довжина проводу у прогоні |
| L_0 | Довжина проводу у вихідному режимі |
| ΔL | Здовження проводу |
| P | Навантаження на конструктивний елемент повітряної лінії |
| R | Гарантоване руйнівне навантаження |
| S | Площа проекції поверхні |
| T | Тяжіння |
| V | Вертикальна складова тяжіння проводу |
| b | Товщина стінки ожеледі |
| d | Діаметр проводу |
| f | Стріла провисання проводу |
| f_{\max} | Габаритна стріла провисання проводу |
| g | Прискорення вільного падіння |
| h_0 | Висота закріплення проводу над землею |
| Δh | Перепад висот точок закріплення проводу на суміжних опорах |
| k | Коефіцієнт запасу міцності |
| $k_{\text{габ}}$ | Коефіцієнт використання габаритного прогону |
| l | Довжина прогону |
| $l_{\text{ваг}}$ | Довжина вагового прогону |
| $l_{\text{вітр}}$ | Довжина вітрового прогону |
| $l_{\text{кр}}$ | Довжина критичного прогону |
| m_0 | Погонна маса проводу (тросу) |
| p | Одиничне навантаження |
| p_0 | Одиничне навантаження у вихідному режимі |
| p_{\max} | Одиничне навантаження в режимі максимальних навантажень |
| q | Швидкісний натиск вітру |
| t | Температура проводу (оточуючого повітря) |
| Δt | Зміна температури проводу (оточуючого повітря) |

| | |
|------------------------------|--|
| t_0 | Температура проводу (оточуючого повітря) у вихідному режимі |
| t_{\max} | Максимальна температура |
| t_{\min} | Мінімальна температура |
| $t_{\text{кр}}$ | Критична температура |
| t_o | Температура в режимі максимальної ожеледі |
| v | Швидкість вітру |
| z_T | Відстань між проводом та тросом всередині прогону |
| G | Габарит повітряної лінії |
| α | Коефіцієнт теплового лінійного здовження проводу |
| α_T | Кут захисту лінії грозозахисним тросом |
| γ | Питоме навантаження |
| γ_{\max} | Притоме навантаження в режимі максимальних навантажень |
| γ_f | Коефіцієнт надійності кліматичних навантажень |
| δ | Деформація |
| $\delta_{\text{гр}}$ | Гранично допустима деформація |
| ε | Відносне здовження проводу |
| θ | Кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводу |
| λ | Довжина ізоляційного підвісу |
| σ | Напруження проводу |
| σ_0 | Напруження проводу у вихідному режимі |
| $\sigma_{\text{доп}}$ | Допустиме напруження проводу |
| $\sigma_{\text{доп}}^{\max}$ | Допустиме напруження проводу в режимі макс. навантажень |
| $\sigma_{\text{доп}}^{\min}$ | Допустиме напруження проводу в режимі мінімальних температур |
| $\sigma_e^{\text{доп}}$ | Допустиме напруження проводу в експлуатаційному режимі |
| σ_O | Напруження проводу в нижній точці провисання |
| $\sigma_{\text{кр}}$ | Напруження проводу в режимі критичної температури |
| φ | Кут відхилення ізоляційного підвісу |

КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

1.1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Головне призначення електричних мереж полягає у передаванні енергії від електричних станцій та її розподіл між споживачами. Одними з основних елементів електричних мереж є лінії електропередавання.

Лінією електропередавання називають інженерну споруду, призначену для передавання електричної енергії по струмопровідних проводах на віддалену відстань [6, 23, 24].

За конструктивним виконанням розрізняють повітряні, кабельні лінії електропередавання, струмопроводи та електропроводки. В сучасних електричних мережах найбільшого поширення (біля 90%) [7] набули *повітряні лінії електропередавання*, виконані, здебільшого, неізолюваними проводами, закріпленими за допомогою траверс, ізоляційних підвісів та лінійної арматури над землею на опорах або інших інженерних спорудах. Основна особливість повітряних ліній полягає в тому, що вони виконанні неізолюваними проводами, які розташовані просто неба та зазнають активного впливу оточуючого середовища [7, 16]. Саме це визначає конструктивне виконання повітряних ліній.

За конструктивним виконанням повітряні лінії поділяють на одноколові, двоколові та багатоколові. Кількість паралельних кіл визначається схемою електропостачання відповідно до транзиту потужності по лінії, її номінальною напругою та вимогами щодо резервування. Кожне коло повітряної електропередачі змінного струму складається з трьох фазних конструкцій струмопроводів та, можливо, четвертого нульового проводу.

Оскільки призначення лінії електропередавання полягає у передаванні електричної енергії на певну відстань, основна вимога до її конструктивного виконання полягає у забезпеченні необхідної пропускну здатності. Слід зважати на те, що протікання робочих струмів по лінії, відповідно до закону Джоуля-Ленца, викликає виділення теплової енергії, що супроводжується нагріванням струмоведучих елементів. Найбільшими осередками нагрівання є місця перехідних опорів, тобто місця з'єднань окремих відрізків проводу, контактів тощо. Таким чином необхідно забезпечувати термічну стійкість лінії електропередавання. Справа в тому, що надмірне перегрівання елементів лінії може призвести до послаблення та руйнування

контактів, що порушує нормальну роботу електропередачі. Для запобігання цього необхідно обмежити робочу температуру струмопровідних проводів лінії. Так для проводів повітряних ліній традиційного виконання робоча температура, зазвичай, не має перевищувати $+70^{\circ}\text{C}$. Конструкції ліній із проводами нового покоління дозволяють збільшити робочу температуру до $+80...+200^{\circ}\text{C}$ та вище відповідно до марки проводу. Необхідну пропускну здатність ліній електропередавання забезпечують вибором номінальної наруги лінії, матеріалу та площі поперечного перерізу струмопровідних проводів та жил ліній електропередавання. Зазначимо, що пропускну здатність ліній електропередавання надвисокої номінальної наруги обмежена також стійкістю режиму електричної системи.

Виконання повітряної лінії неізолюваними проводами означає, що основним ізоляційним матеріалом є повітря. Для гарантування електричної міцності конструкції повітряної лінії необхідно передбачити забезпечення нормованих ізоляційних проміжків таким чином, щоб унеможливити перекриття між струмопровідними проводами суміжних фаз, а також між фазними проводами та заземленими елементами опор. Крім того необхідно гарантувати безпеку експлуатації лінії шляхом забезпечення нормованих габаритних відстаней між проводом та землею, або інженерною спорудою таким чином, щоб унеможливити враження електричним струмом людини, яка може опинитися під проводами лінії. Для ліній електропередавання надвисокої номінальної наруги додатково слід обмежити допустимих значень напруженість електричного поля під проводами лінії. Зазначені вимоги задовольняє конструкція опори повітряної лінії, яка визначає взаємне розташування фазних проводів у просторі та відносно землі.

Для повітряних ліній електропередавання обов'язково необхідно враховувати кліматичні навантаження та впливи, які зазнають конструктивні елементи, розташовані просто неба. Тут, зазвичай, розглядають вплив температури повітря в районі траси лінії, навантаження від ваги відкладень ожеледі та натиску вітру. Так, наприклад, збільшення температури повітря призводить до теплового здовження проводів лінії, збільшення стріл провисання і, як наслідок, до зменшення габаритної відстані між проводом та землею. Навпаки, в режимах мінімальних температур довжина проводу скорочуються, стріла провисання зменшується, але збільшується тяжіння в матеріалі проводу. Відкладення ожеледі на проводах повітряної лінії визначають додаткові механічні навантаження, які призводять до одночасного збільшення стріл провисання та механічного тяжіння проводу. Натиск вітру задає додаткове горизонтальне навантаження на конструктивні елементи повітряної лінії, що призводить до збільшення тяжіння проводу та відхилення стріли провисання від вертикальної площини. Під час обґрунтування конструкції повітряної лінії обов'язково розглядають можливі поєднання різних кліматичних навантажень та впливів, зокрема, розглядають режим вітру під час ожеледі. Крім того розглядають динамічний вплив

вітру на конструктивні елементи повітряної лінії, який може викликати вібрацію та галопування проводів, а також інші види коливань.

Активний вплив атмосфери на конструктивні елементи повітряної лінії електропередавання визначає проблему запобігання корозії. Справа в тому, що сталеві елементи конструкції лінії (опори, осереддя проводів, елементи лінійної арматури) піддаються корозії навіть за нормальних атмосферних умов, а у разі проходження траси лінії поблизу хімічних підприємств, або на узбережжі морів корозії піддаються також алюмінієві проводи проводів. Таким чином, для забезпечення надійності конструкції повітряної лінії необхідно передбачити певні запобіжні антикорозійні заходи, наприклад, оцинковування сталевих проводів та сталевих опор, фарбування опор, застосування спеціальних антикорозійних мастил тощо.

Конструкція повітряної лінії електропередавання має бути захищена від перенапруг внаслідок прямого попадання блискавки, або у разі грозозового розряду поблизу траси лінії. Для цього використовують грозозахисні троси, захисне заземлення опор, обмежувачі перенапруг та інше устаткування.

Конструктивне виконання повітряної лінії, як і будь-якої іншої технічної системи, має обов'язково задовольняти вимогам економічності щодо будівництва та подальшої експлуатації лінії. Слід зазначити, що задачі техніко-економічного обґрунтування конструкції повітряної лінії, зазвичай, є оптимізаційними, направленими на визначення доцільного балансу між різними взаємовиключними факторами.

З метою забезпечення економічності конструкції повітряної лінії струмоведучі проводи натягують. Дійсно, натягування проводів призводить до зменшення стріл провисання, що дозволяє збільшити прогони між опорами лінії і, як наслідок, зменшити необхідну кількість опор. З іншого боку, натягування проводів лінії обумовлює необхідність посилення механічної міцності і, як наслідок, матеріалоемності конструкції опор. Слід зазначити, що натягування проводів здійснюють не на кожній опорі, а лише на деяких. Такі опори називають анкерними. Інші опори призначені лише для підтримки проводів над землею та мають назву проміжних опор.

Техніко-економічному обґрунтуванню підлягає також конструктивне виконання опор повітряної лінії. Так, наприклад, збільшення висоти опор дозволяє скоротити їх загальну кількість через збільшення висоти закріплення проводів над землею. З іншого боку, збільшення висоти опори визначає збільшення витрат конструктивних матеріалів, ускладнення монтажу та експлуатації опор і, як наслідок, до збільшення собівартості одиничних опор. Навпаки, зменшення висоти опори призводить до її здешевлення, але визначає їх більшу загальну кількість. Багаторічний світовий досвід проектування та будівництва повітряних ліній різних класів номінальної напруги визначив уніфікацію типових конструкцій опор повітря-

них ліній. Разом з тим, застосування новітніх технологій у конструктивному виконанні повітряних ліній електропередавання визначає необхідність розробки нових типів опор.

Таким чином конструкція ліній електропередавання має відповідати наступним вимогам:

- 1) забезпечення необхідної пропускної здатності лінії та термічної стійкості струмопровідних елементів;
- 2) забезпечення електричної міцності конструкції лінії, тобто забезпечення нормованих ізоляційних проміжків між фазними проводами та надійної ізоляції струмопровідних проводів лінії від конструктивних елементів опори, зокрема металевих траверс;
- 3) гарантування безпеки експлуатації повітряної лінії, тобто забезпечення нормованих габаритних відстаней між проводами повітряної лінії та землею або інженерними спорудами в нормальних та аварійних режимах;
- 4) забезпечення надійності та механічної міцності конструкції повітряної лінії за будь-яких можливих поєднань кліматичних навантажень та впливів;
- 5) забезпечення корозійної стійкості конструктивних елементів лінії;
- 6) забезпечення економічності конструкції лінії, що полягає у мінімізації витрат на будівництво та експлуатацію повітряних ліній.

Основними конструктивними елементами повітряних ліній електропередавання є [6]:

- струмопровідні проводи;
- опори;
- ізоляційні підвіси;
- лінійна арматура;
- грозозахисні троси;
- фундаменти опор.

На рис. 1.1 умовно представлена ділянка повітряної лінії, де для спрощення показано положення лише нижнього фазного проводу. На рис. 1.1 застосовано наступні позначення: 1 – анкерні опори; 2 – проміжні опори; 3 – фазний струмопровідний провід; 4 – грозозахисний трос; 5 – натяжні ізоляційні підвіси; 6 – підвісні ізолятори; 7 – шлейф; 8 – прогін; 9 – анкерний прогін; 10 – анкерована ділянка; 11 – габарит; 12 – стріла провисання.

Ділянку між суміжними опорами будь-якого типу, або конструкціями, які заміщують опори, називають *прогоном* (на рис. 1.1 позначено 8).

Довжина прогону – довжина горизонтальної проекції прогону.

Анкерним прогоном називають прогін, обмежений опорами анкерного типу (на рис. 1.1 позначено 9).

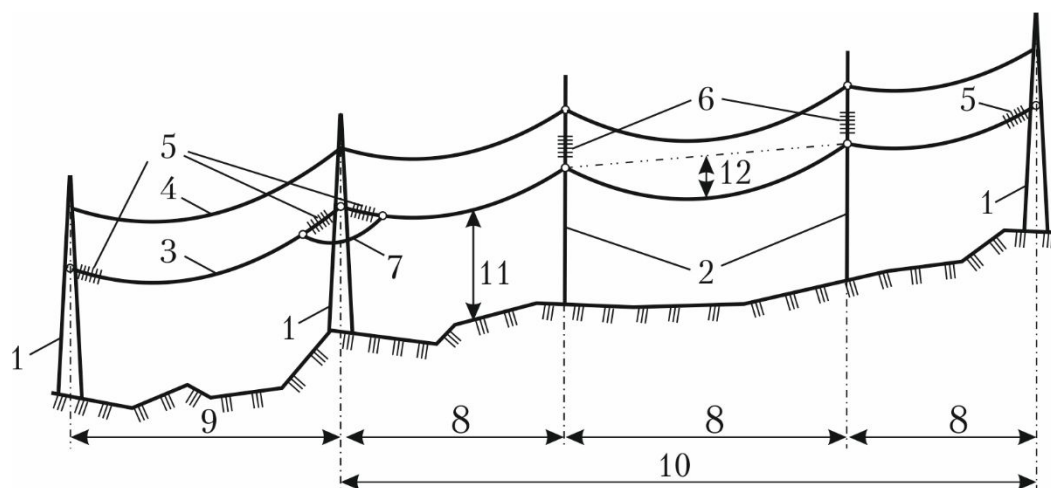


Рис. 1.1. Ділянка повітряної лінії електропередавання

Ділянку між анкерними опорами, на якій встановлено проміжні опори називають *анкерованою ділянкою* (на рис. 1.1 позначено 10).

Габаритом називають відстань по вертикалі між нижнім проводом в прогоні та землею або інженерною спорудою під лінією електропередавання (на рис. 1.1 позначено 11).

Стрілою провисання називають відстань по вертикалі між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та проводом у середині прогону (на рис. 1.1 позначено 12).

Конструктивне виконання фази повітряної лінії визначається її номінальною напругою, маркою та перерізом проводів, їх кількістю в кожній фазі, взаємним розташуванням проводів та відстанями між ними. В табл. 1.1 наведені типові конструктивні розміри повітряних ліній різних класів номінальної напруги.

Таблиця 1.1. Конструктивні розміри повітряних ліній

| Номінальна напруга, кВ | Кількість проводів у фазі | Відстань між проводами, м | Довжина прогону, м | Висота опори, м | Габаритна відстань, м |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| до 1 | 1 | 0,5 | 40–50 | 8–9 | 6–7 |
| 6–10 | 1 | 1 | 50–100 | 10 | 6–7 |
| 35 | 1 | 3 | 150–200 | 10 | 6–7 |
| 110 | 1 | 4 | 170–250 | 13–14 | 6–7 |
| 220 | 1 | 7 | 250–350 | 25–30 | 7–8 |
| 330 | 2 | 9 | 300–400 | 25–30 | 7,5–8 |
| 500 | 3 | 12 | 350–450 | 25–30 | 8 |
| 750 | 4–5 | 15 | 450–750 | 30–41 | 10–12 |

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення лінії електропередавання.
2. У чому полягає особливість конструктивного виконання повітряних ліній електропередавання?
3. Перелічіть та прокоментуйте основні вимоги до конструктивного виконання повітряних ліній електропередавання.
4. Перелічіть основні конструктивні елементи повітряних ліній електропередавання.
5. Дайте визначення прогону, довжини прогону, анкерованої ділянки, габариту повітряної лінії та стріли провисання.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 7-19; [31], с. 9-19.

1.2. ПРОВОДИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

В конструкціях повітряних ліній електропередавання використовують, зазвичай, неізолювані проводи, розташовані просто неба. Це визначає основні вимоги до конструктивного виконання проводів повітряних ліній [6, 16]:

- 1) висока електрична провідність;
- 2) мала вага проводу;
- 3) висока механічна міцність;
- 4) незначна реакція на зміну кліматичних умов експлуатації лінії;
- 5) висока корозійна стійкість;
- 6) економічність конструкції.

Зазначені вимоги визначають використання для виготовлення проводів повітряних ліній міді, алюмінію та його сплавів, сталі [4, 7]. В табл. 1.2 наведена інформація про електротехнічні та механічні властивості зазначених матеріалів.

Таблиця 1.2. Фізико-технічні властивості металів, з яких виготовляють проводи повітряних ліній

| Параметр | Мідь | Алюміній | Сталь |
|---|---------|-----------|---------|
| Питомий омичний опір, 10^{-3} Ом·мм ² /м | 17,8 | 26,2–29,5 | 103–137 |
| Густина, кг/м ³ | 8890 | 2700 | 7880 |
| Граничний опір на розрив, МПа | 360–400 | 156–180 | 700–750 |
| Модуль пружності, ГПа | 122–135 | 63 | 200 |
| Коефіцієнт лінійного розширення, 10^{-6} град ⁻¹ | 16,8 | 23 | 12 |

Мідь – пластичний ковкий метал червонувато-золотистого кольору, який характеризується найкращими електрофізичними та механічними властивостями. Питомий омичний опір міді складає $0,0178 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$ (друге місце серед відомих металів після срібла), а граничний опір на розрив досягає 360...400 МПа. Мідь є порівняно малоактивним металом. За нормальних умов в сухому повітрі окислення міді не відбувається, у вологому повітрі відбувається окислення з утворенням карбонату міді. Однак мідь це дефіцитний матеріал, тому використання мідних проводів для виконання повітряних ліній потребує спеціального техніко-економічного обґрунтування. Мідні проводи часто використовують в контактних мережах електротранспорту, інколи у повітряних лініях, які проходять в районах з агресивною атмосферою – поблизу узбережжя морів та хімічних підприємств.

Широкого застосування для виготовлення проводів набув більш розповсюджений у природі алюміній (перше місце за розповсюдженістю серед металів та третє місце серед усіх елементів після кисню та кремнію). Алюміній – це сріблясто-білий легкий пластичний метал, що легко піддається механічній обробці. Алюміній приблизно в 3,3 рази легший за мідь та характеризується високою електропровідністю (четверте місце серед відомих металів після срібла, міді та золота). Електрична провідність хімічно чистого алюмінію (чистотою 99,99%) складає 63,7% від електропровідності міді. На електропровідність алюмінію впливає ряд факторів, зокрема, ступінь деформації, режим термічної обробки, наявність та природа домішок. Питомий омичний опір міді лежить в межах $0,0262...0,0295 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$. Головним недоліком алюмінію є його недостатня механічна міцність. Межа міцності алюмінієвих проволочок на розрив складає всього 156...180 МПа. Це визначає використання алюмінію для виготовлення проводів повітряних ліній з невеликими прогонами між опорами, тобто місцевих розподільчих мереж з номінальною напругою до 10 кВ. За нормальних умов алюміній покритий тонкою міцною окисдною плівкою, через наявність якої алюміній не вступає в реакції з класичними окиснювачами та майже не піддається корозії.

Сплави з алюмінію характеризуються підвищеною механічною міцністю. Так, наприклад, альдрей, що є сплавом алюмінію із залізом (до 0,2%), магнієм (0,7%) та кремнієм (0,8%), за механічними властивостями наближається до твердої міді, а за густиною та електропровідністю – до твердого алюмінію. Водночас основним недоліком альдрею є мала стійкість під час вібрації.

Сталь – сплав заліза з вуглецем (0,1...0,15%) та іншими домішками (кремній, марганець, сірка, фосфор). Сталь має найкращі фізико-механічні властивості. Механічна міцність сталі на розрив досягає 700...750 МПа. Разом з тим електрична провідність сталі в 6-7 разів менша, ніж у міді. Питомий омичний опір сталі складає всього $0,13...0,137 \text{ Ом}\cdot\text{м}/\text{мм}^2$. До того

ж сталь відноситься до групи феромагнетиків, в сталевих проводах на змінному струмі проявляється поверхневий ефект та виникають втрати потужності на гістерезис. Ще одним важливим недоліком сталі є висока корозійність, що не дозволяє використовувати сталеві проводи без спеціальної обробки, наприклад, оцинковування. Зазначені властивості сталі визначили її застосування для виготовлення опор повітряних ліній, грозозахисних тросів, а також для посилення механічної міцності алюмінію у складі сталюалюмінієвих проводів. Сталеві проводи, інколи, використовують для виконання повітряних ліній розподільних електричних мереж з номінальною напругою до 10 кВ з малими робочими струмами у разі, коли вирішальним є висока механічна міцність проводу а не його електрична провідність.

За конструктивним виконанням проводи поділяють на однопроволочні та багатопроволочні. В конструкціях повітряних ліній використовують багатопроволочні проводи, які являють собою линви, звиті з окремих проволоч, як показано на рис. 1.2. В таких проводах навколо центральної проволочки виконують повив з шести проволоч, закручених у певному напрямі. Кожний наступний повив містить на шість проволоч більше попереднього. Для забезпечення круглої форми проводу проволочки суміжних повивів закручують у протилежні напрями. При цьому проволочки зовнішнього повиву завжди направлені праворуч з метою уніфікації конструкції лінійної арматури.



Рис. 1.2. Зовнішній вигляд багатопроволочних проводів повітряних ліній електропередавання

Багатопроволочні проводи характеризуються високою гнучкістю і, отже, надійністю роботи в повітряній лінії. За своїми механічними властивостями багатопроволочні проводи істотно переважають однопроволочні того ж перерізу. Такі проводи можна виготовити будь-якого діаметру та перерізу. Діаметри окремих проволочок та їх кількість обирають таким чином, щоб сума перерізів окремих проволочок дала необхідний сумарний переріз проводу.

В конструкціях повітряних ліній електропередавання часто використовують комбіновані проводи скручені з проволочок двох різних металів. Так, для забезпечення високої механічної міцності проводи повітряних ліній зазвичай виконують із осереддям з оцинкованих сталевих проволочок. Такі проводи називають сталеалюмінієвими. Конструкція сталеалюмінієвого проводу представлена на рис. 1.3. В таких проводах основне механічне навантаження сприймає сталеве осереддя. Зовнішній алюмінієвий шар забезпечує високу електричну провідність проводу та його пропускну здатність. Тут, відповідно до скін-ефекту, змінний струм витісняється до зовнішніх шарів проводу. Це дозволяє вважати, що струм в сталевому осередді відсутній і має місце лише в алюмінієвих проволочках проводу.

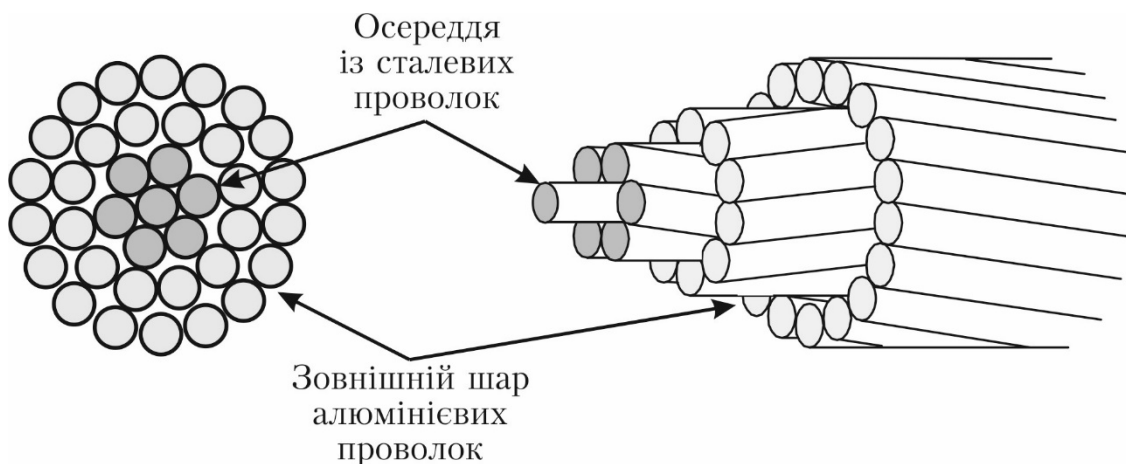


Рис. 1.3. Конструкція сталеалюмінієвого проводу

Відповідно до співвідношення перерізу струмопровідної частини проводу до перерізу сталевого осереддя сталеалюмінієві проводи поділяють на такі типи:

- для роботи в умовах середніх механічних навантажень (співвідношення перерізів в межах 6,0...6,16);
- посиленої механічної міцності (4,29...4,39);
- особливо посиленої міцності (0,65...1,46);
- полегшеної конструкції (7,71...8,03);
- особливо полегшеної конструкції (12,22...18,09).

Застосування сталевалюмінієвих проводів з відповідним відношенням перерізів алюмінієвої частини до сталевого осереддя визначається механічними навантаженнями, які зазнає провід в процесі експлуатації.

На рис. 1.4 представлено, наприклад, поперечні перерізи сталевалюмінієвих проводів АС 300/39, АС 300/48, АС 300/66 та АС 300/204, а в табл. 1.3 зіставлено характеристики цих проводів.

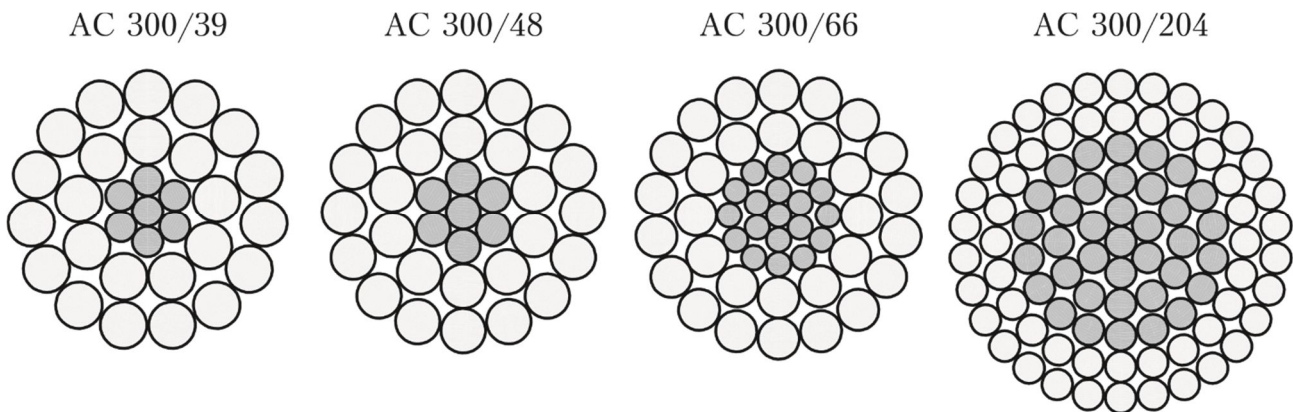


Рис. 1.4. Поперечні перерізи сталевалюмінієвих проводів АС 300

Таблиця 1.3. Характеристики сталевалюмінієвих проводів АС 300

| Провід | АС 300/39 | АС 300/48 | АС 300/66 | АС 300/204 |
|--|-----------|-----------|-----------|------------|
| Діаметр сталевих проволоч, мм | 2,65 | 2,95 | 2,1 | 2,65 |
| Кількість сталевих проволоч, шт | 7 | 7 | 19 | 37 |
| Сумарний переріз сталевих проволоч, мм ² | 38,61 | 47,84 | 65,80 | 204,06 |
| Діаметр алюмінієвих проволоч, мм | 4 | 3,8 | 3,5 | 2,65 |
| Кількість алюмінієвих проволоч, шт | 24 | 26 | 30 | 54 |
| Сумарний переріз алюмінієвих проволоч, мм ² | 301,58 | 294,86 | 288,63 | 297,83 |
| Зовнішній діаметр проводу, мм | 24,0 | 24,1 | 24,5 | 29,2 |
| Сумарний переріз проводу, мм ² | 340,19 | 342,70 | 354,43 | 501,89 |
| Відношення А/С | 7,81 | 6,16 | 4,39 | 1,46 |
| Електричний опір постійному струму, Ом/км | 0,0958 | 0,0978 | 0,1000 | 0,0968 |

Аналіз інформації, наведеної в табл. 1.3 свідчить про те, що порівняні проводи характеризуються однаковими номінальними перерізами струмопровідної частини, що визначає майже однакові електротехнічні властивості проводів (несуттєва відмінність опорів активному струму обумовлена відмінністю фактичних сумарних перерізів алюмінієвих проволок). Водночас, різна конструкція сталевого осереддя проводів визначає відмінності їх фізико-механічних властивостей. Відношення перерізів алюмінієвої частини проводу до сталевого осереддя визначає призначення проводу АС 300/48 для роботи в умовах середніх механічних навантажень, провід АС 300/39 характеризується полегшеною міцністю, провід АС 300/66 – посиленою міцністю, а провід АС 300/204 – особливо посиленою міцністю.

Для виконання блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання використовують сталеві проводи та линви, а також сталюалюмінієві проводи особливо посиленої міцності, у разі, якщо грозозахисний трос додатково призначений для організації каналів високочастотного зв'язку.

Для виконання повітряних ліній електропередавання та розподільних пристроїв підстанцій використовують також інші конструкції проводів та тросів.

Так, для ошиновки підстанцій 330 кВ та вище часто застосовують порожнисті проводи – неізольовані проводи трубчастої форми. Такі проводи виконують з одного повиву плоских алюмінієвих проволок спіральної форми, зчеплених між собою в замок за допомогою пазів, як показано на рис. 1.5. Через вільне переміщення проволок у замку порожнистий провід характеризується достатньою гнучкістю. Конструкція порожнистих проводів забезпечує зниження втрат енергії на корону через збільшення діаметру проводу без невиправданого збільшення витрат металу. Крім того, через скін-ефект і витіснення змінного струму із внутрішніх шарів забезпечується покращене використання металу проводу.

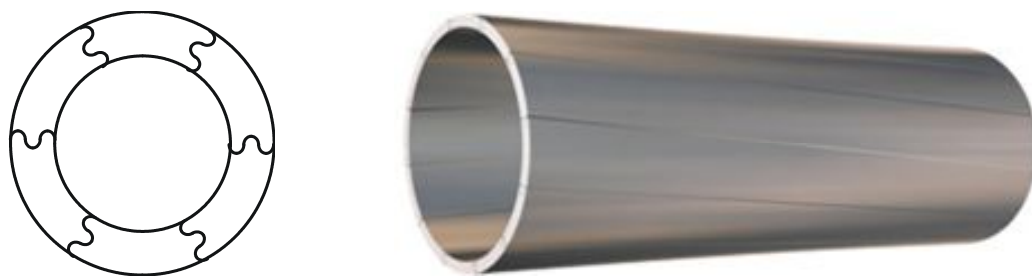


Рис. 1.5. Конструкція та зовнішній вигляд порожнистого проводу маки АП

Останнім часом в конструкціях повітряних ліній електропередавання широкого застосування набувають високовольні неізолювані проводи нового покоління. Конструктивно такі проводи виконують з Z-подібних або трапеціяподібних проволок, виготовлених з матеріалів з підвищеними електричними та механічними характеристиками. На рис. 1.6 наведено зовнішній вигляд найбільш розповсюджених типів проводів нового покоління марок Aero-Z та HVCRC.



а) Aero-Z



б) HVCRC

Рис. 1.6. Конструкція компактних проводів нового покоління

Зовнішні шари проволок проводу марки Aero-Z мають Z-подібну форму, що обумовлює підвищену щільність струмопровідного матеріалу. В проводах марки HVCRC такий ефект досягають застосуванням трапеціяподібних проволок. Для виконання проволок проводів нового покоління використовують такі матеріали, як термооброблений алюміній, сплави алюмінію з додаванням рідкісноземельних металів, алюміній-цирконієві сплави тощо. Такі матеріали забезпечують більші електричну провідність, максимально допустиму температуру проводу та корозійну стійкість, порівняно з традиційними сталю-алюмінієвими проводами.

Для виконання несучого осереддя в проводах нового покоління часто використовують композитні матеріали, які забезпечують менші значення коефіцієнту теплового здовження, а, отже, менші стріли провисання проводів, меншу вагу проводів тощо. Саме така конструкція осереддя використана в проводі марки HVCRC, представленому на рис. 1.6 б.

На рис. 1.7 представлено зіставлення багатопроволочного проводу традиційної конструкції з проводом марки HVCRC того самого діаметру.

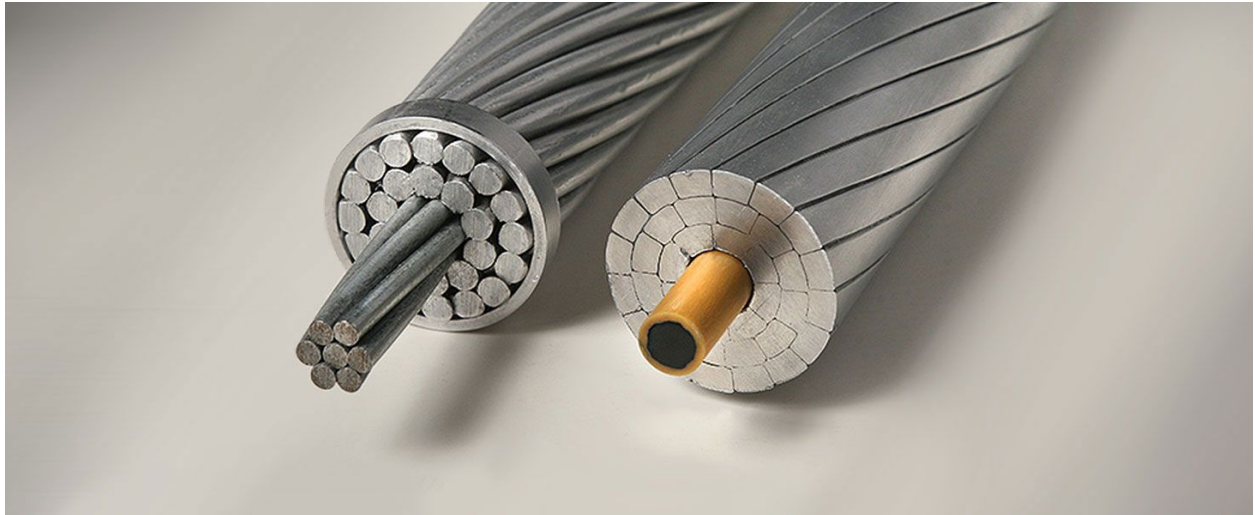


Рис. 1.7. Зіставлення багатопроволочного проводу традиційної конструкції з проводом нового покоління марки HVCRC

Підвищена щільність проволочок зовнішнього шару проводів нового покоління забезпечує більший переріз порівняно з проводами традиційного виконання, що визначає більшу пропускну здатність ліній електропередавання. Саме тому проводи нового покоління часто називають компактними.

Зовнішня поверхня проводів нового покоління значно гладкіша за поверхню проводів традиційного виконання. Це визначає кращі аеродинамічні та гідрофобні властивості проводів нового покоління. Як наслідок, такі проводи зазнають менші навантаження від натиску вітру та відкладень ожеледі опадів, ніж проводи традиційного виконання.

Останнім часом повітряні лінії електропередавання інколи суміщають із волоконно-оптичними каналами зв'язку у складі волоконно-оптичних ліній зв'язку на повітряній лінії електропередавання. В таких лініях оптичний кабель підвішують на опорах повітряної лінії за допомогою спеціальної арматури або навивають його на грозозахисний трос чи струмопровідний провід. Інколи для виконання волоконно-оптичних ліній зв'язку на повітряних лініях використовують спеціальні проводи та троси, суміщені зі волоконно-оптичним кабелем, розташованим всередині проводів та тросів. Такі комбіновані проводи та троси забезпечують одночасне передавання електричної енергії або блискавкозахист повітряних ліній та забезпечують організацію високошвидкісних каналів зв'язку. Проводи та троси з вбудованим оптичним кабелем містять оптичний модуль в захисній оболонці, який знаходиться в центральній частині проводу, або в одному з повивів, як показано на рис. 1.8 та 1.9.

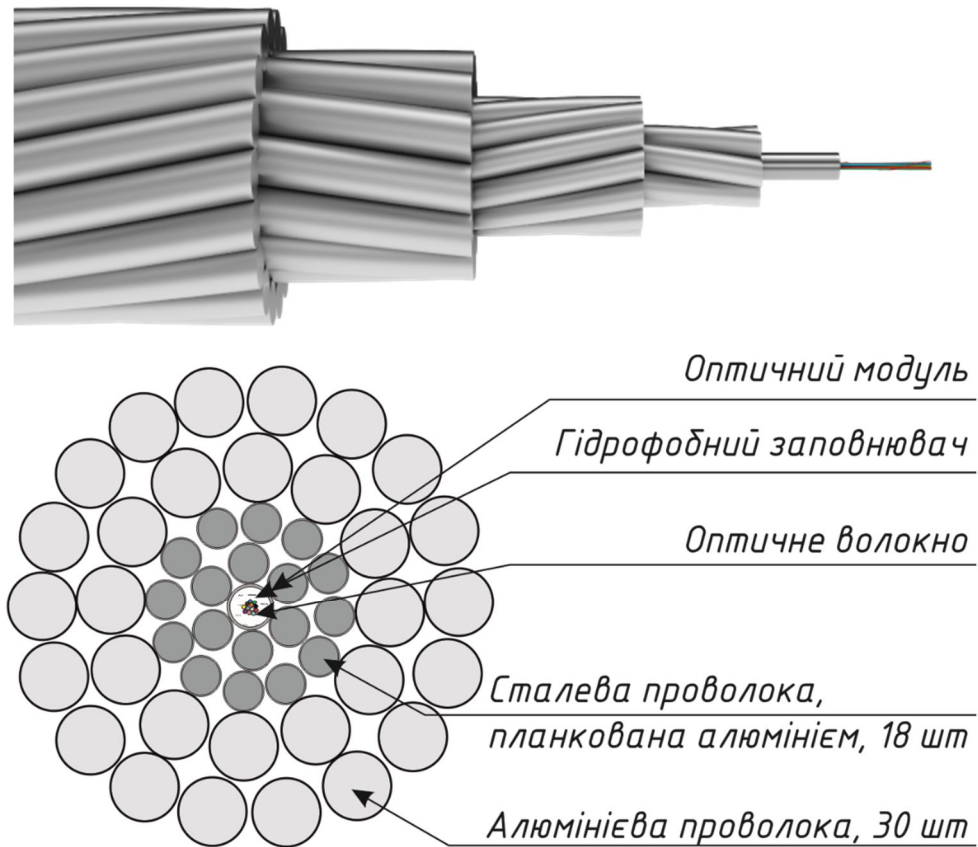


Рис. 1.8. Зовнішній вигляд та конструкція проводу ОКФП 300/66

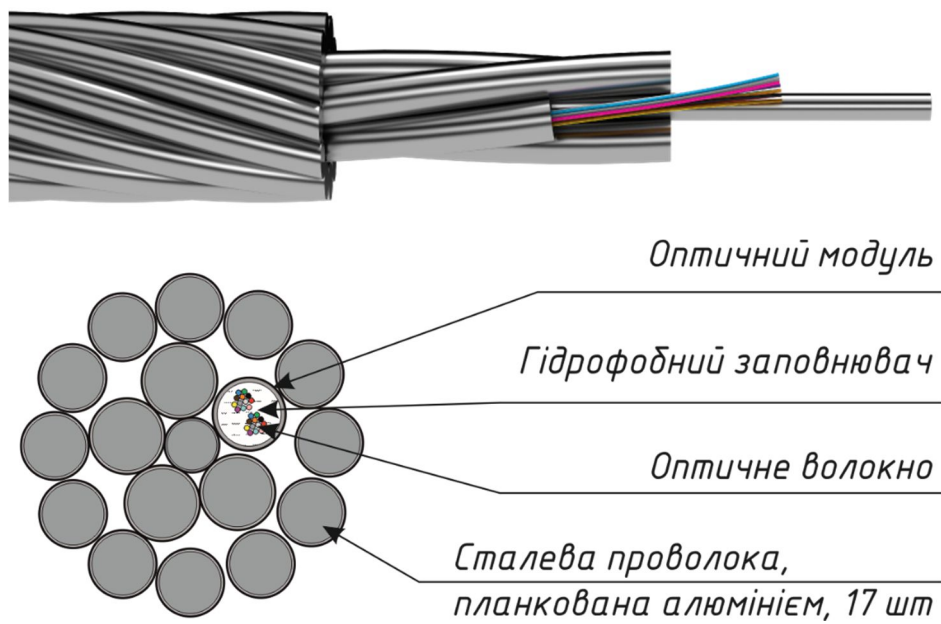


Рис. 1.9. Зовнішній вигляд та конструкція грозозахисного тросу ОКГТ-С 95

Для виконання розподільних електричних мереж останнім часом широкого застосування набули повітряні лінії із захищеними проводами, виконаними самоутримними ізолюваними проводами (СІП) [15]. Такі проводи поєднують в своїй конструкції особливості виконання кабельних та повітряних ліній електропередавання. Струмопровідні жили покриті шаром екструдованого полімерного захисного ізоляційного матеріалу та мають посилену механічну міцність, що дозволяє закріплювати їх на опорах повітряних ліній.

Конструктивно самоутримні ізолювані проводи складаються із скручених в джгут алюмінієвих ізолюваних жил однакового перерізу. Ізоляція жил виконана з світлостабілізованого поліетилену високого тиску чорного кольору, стійкого до впливу ультрафіолетового випромінювання. Для забезпечення необхідної механічної міцності проводу одна або всі жили містять сталеве осереддя. Типові конструкції самоутримних ізолюваних проводів представлено на рис. 1.10.

До складу самоутримного ізолюваного проводу можуть бути включені додаткові струмопровідні жили меншого перерізу для забезпечення живлення освітлення, сигналізації тощо. На сьогодні найбільшого поширення набуло використання повітряних ліній з захищеними проводами в розподільних електричних мережах напругою 0,4–10–35 кВ. Разом з тим відомі конструкції самоутримних ізолюваних проводів для ліній електропередавання напругою 110 кВ.

В подальшому викладенні матеріалу посібнику головна увага буде приділятися повітряним лініям з проводами традиційного виконання. Разом з тим, очевидно, що фізичний зміст явищ та процесів в лініях, виконаних проводами нового покоління, залишається тим самим, а під час визначення механічних характеристик таких ліній необхідно враховувати особливості конструктивного виконання проводів та тросів.

Маркування проводів традиційного виконання вітчизняного виробництва складається з літеро-цифрового коду [19]. Літери означають матеріал, з якого виготовлені проволочи проводу:

- М – мідний провід;
- А – алюмінієвий провід;
- АН, АЖ – провід зі сплавів алюмінію;
- С – сталевий провід;
- АС – сталюалюмінієвий провід.

Крім того, літерний код маркування проводів може містити інформацію про застосування антикорозійних мастил:

- АКП, АНКП, АЖКП, АСКП – алюмінієвий або сталюалюмінієвий провід, міжпроводочний простір якого заповнений нейтральним мастилом;

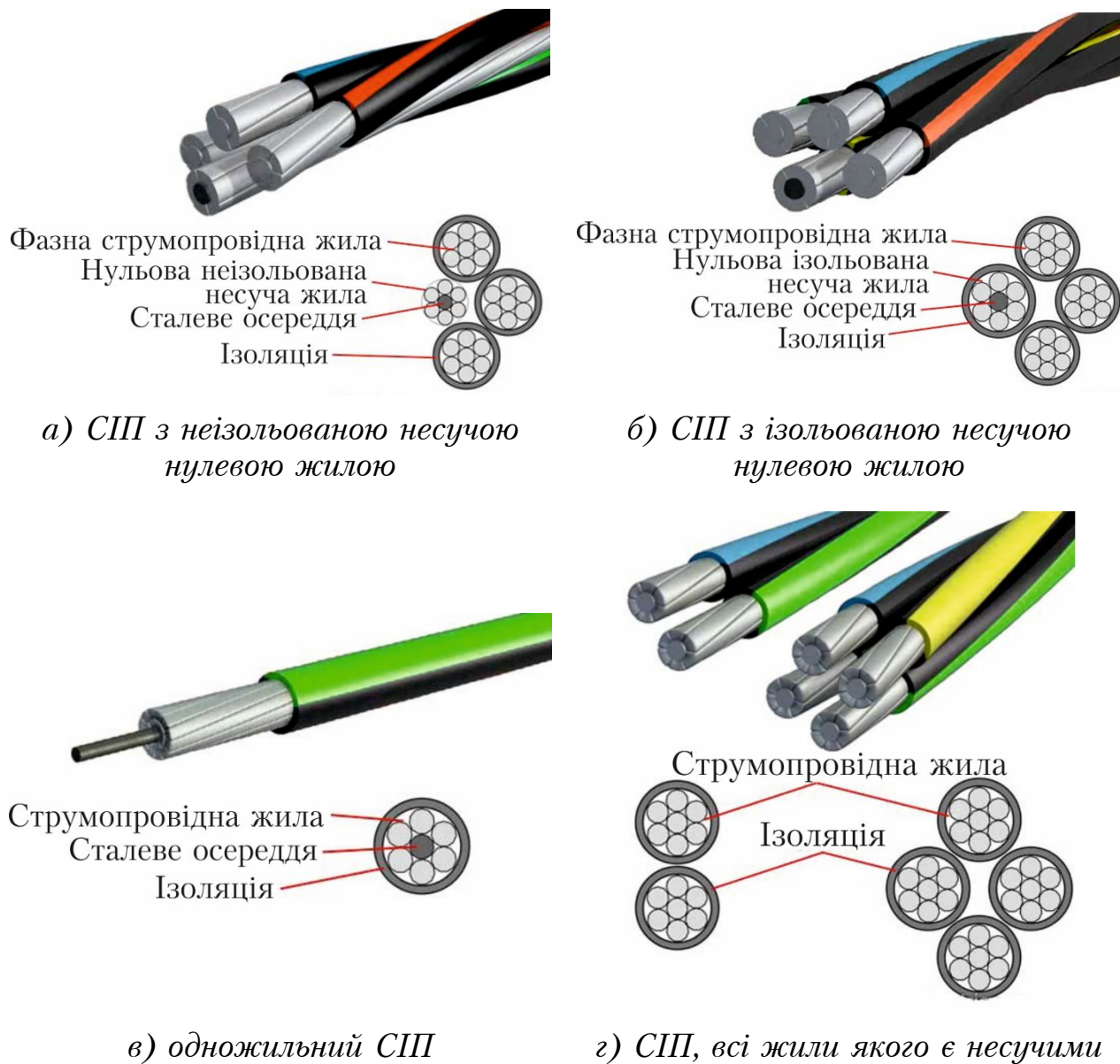


Рис. 1.10. Конструкції самоутримного ізолюваного проводу:

а) чотирижильні проводи з неізолюваною несучою нульовою жилкою – «фінська» система; б) чотирижильні проводи з ізолюваною несучою нульовою жилкою – «французька» система; в) одножильні самонесучі проводи – різновид «фінської» системи; г) чотири- або двожильні проводи, всі жили є несучими – «шведська» система.

- АСКС – сталевалюмінієвий провід, в якому міжпроволочний простір сталевого осереддя заповнений нейтральним мастилом;
- АСК – сталевалюмінієвий провід, в якому міжпроволочний простір сталевого осереддя заповнений нейтральним мастилом та ізолюваний двома поліетиленовими стрічками.

Цифровий код маркування проводу означає його номінальний переріз. Для сталевалюмінієвих проводів маркування містить дві цифри, розділених косою – номінальний переріз алюмінієвої частини та номінальний переріз сталевого осереддя. Інколи в позначення сталевалюмінієвих проводів останнє значення опускають. Це пояснюють тим, що сталеве осереддя таких проводів призначене лише для забезпечення необхідної механічної міцності. Струмopровідним є лише зовнішній алюмінієвий шар. Тому в задачах дослідження процесів передавання енергії по лініям електропередавання має сенс лише значення перерізу зовнішнього алюмінієвого шару.

Чинні нормативні документи, зокрема [19], регламентують шкалу номінальних перерізів проводів повітряних ліній. Зокрема для сталевалюмінієвих проводів шкала номінальних перерізів алюмінієвого шару складається з наступного ряду: 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 330, 400, 500, 600, 700, 800, 1000 мм². Дійсні перерізи проводів можуть дещо відрізнятися від наведених номінальних значень відповідно до кількості та перерізу проволочок, з яких звитий багатопроволочний провід.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Перелічіть основні вимоги, які висувають до конструктивного виконання проводів повітряних ліній електропередавання.*
2. *Перелічіть та охарактеризуйте основні матеріали, які використовують для виготовлення проводів повітряних ліній електропередавання.*
3. *Наведіть та охарактеризуйте класифікацію конструктивного виконання проводів повітряних ліній.*
4. *Поясніть особливості конструктивного виконання сталевалюмінієвих проводів.*
5. *Поясніть використання порожнистих проводів тільки для виконання шин підстанцій надвисокої номінальної напруги.*
6. *Дайте характеристику компактних проводів нового покоління.*
7. *Дайте визначення та наведіть особливості конструктивного виконання волоконно-оптичної лінії зв'язку на повітряній лінії електропередавання.*
8. *У чому полягає особливість конструктивного виконання самоутримних ізолюваних проводів?*
9. *Наведіть принципи маркування проводів традиційного виконання.*
10. *Наведіть шкалу номінальних перерізів проводів повітряних ліній за струмопровідною частиною.*



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 21-38; [16], с. 10-20; [34], с. 15-23.

1.3. ОПОРИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Проводи повітряних закріплюють на *опорах* – будівельних конструкціях призначених для утримання проводів та грозозахисних тросів над землею та забезпечення нормованого взаємного розташування струмопровідних проводів та тросів [25]. Опори складаються з вертикальних стояків, горизонтальних траверс та фундаментів. Також на опорах здійснюють необхідне натягування проводів. Ці фактори визначають основні вимоги, які висувають до конструктивного виконання опор повітряних ліній електропередавання:

- 1) забезпечення нормованої габаритної відстані між проводами повітряної лінії та землею або інженерними спорудами в нормальних та аварійних режимах лінії;
- 2) забезпечення нормованих ізоляційних проміжків між фазними проводами повітряної лінії;
- 3) забезпечення надійності та механічної міцності конструкції повітряної лінії;
- 4) забезпечення економічності конструкції опори.

Основними матеріалами для виготовлення опор є залізобетон та сталь, рідше – дерево. Останнім часом з'явилися нові конструкції опор, виготовлені з композитних матеріалів.

Дерев'яні опори виготовляють з круглих соснових або мондринних колод. Такі опори використовують в конструкціях низьковольтних ліній електропередавання напругою 0,4-10 кВ. Проте на сьогодні подекуди залишились в експлуатації дерев'яні опори вищих класів номінальної напруги. Загальний вигляд дерев'яної опори наведено на рис. 1.11. Дерев'яні опори характеризуються малою вагою, простотою виготовлення та транспортування, високими діелектричними властивостями, гнучкістю тощо. Однак, головний недолік дерев'яних опор полягає в малому періоді експлуатації через гниття деревини. Саме тому енергетична галузь України, свого часу, відмовилась від використання дерев'яних опор. Проте, останнім часом, на ринку з'явилися нові, надійні, екологічно чисті антисептики, які, навіть у контакті з землею, забезпечують термін служби дерев'яних опор до 45 років. Це спричинило повернення до застосування дерев'яних опор в електричних мережах 0,4-10 кВ.

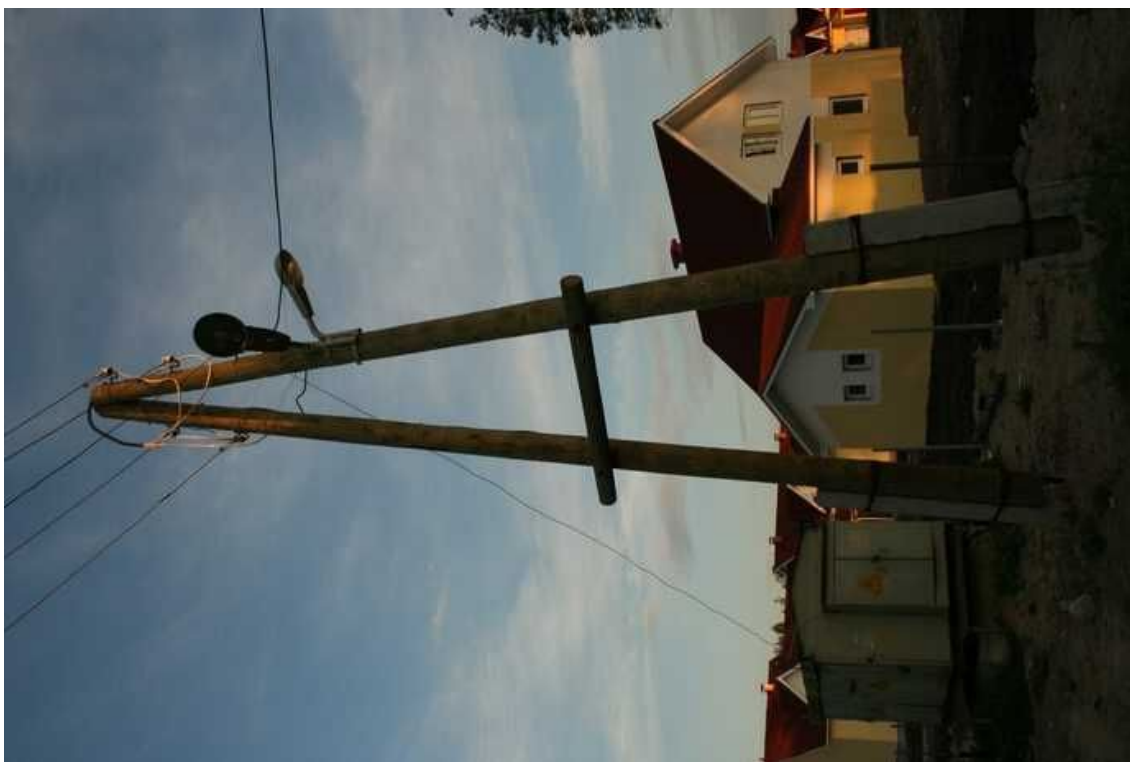


Рис. 1.11. Дерев'яна опора повітряної лінії 0,4 кВ



Рис. 1.12. Залізобетонна проміжна опора повітряної лінії 330 кВ



Рис. 1.13. Металева анкерна кутова опора повітряної лінії 35 кВ



Рис. 1.14. Анкерна багатогранна металева опора лінії 110 кВ

Загальний вигляд залізобетонної опори наведено на рис. 1.12. Така опора складається з вертикального залізобетонного стояка, заглибленого та закріпленого в ґрунті та металевих траверс, на яких закріплюють струмопровідні проводи. Залізобетонні опори характеризуються простотою виготовлення, дешевизною та простотою обслуговування. Разом з тим їх застосування обмежують такі фактори, як велика вага опор та труднощі, пов'язані із транспортуванням.

Металева решітчаста опора представлена на рис. 1.13. Така опора складається з сталевих ферм, скріплених болтовими або зварними з'єднаннями. Металеві опори закріплюють в ґрунті на залізобетонних фундаментах. Металеві опори дорожчі за залізобетонні, потребують регулярного обслуговування, пов'язаного з антикорозійними заходами. Проте такі опори складаються з окремих елементів, які збирають на місці монтажу, що дозволяє створювати конструкції будь-якої необхідної форми, адаптованої до конкретних умов місцевості. В умовах важкодоступних трас повітряних ліній інколи застосовують металеві опори з алюмінієвих сплавів. Такі опори не потребують антикорозійного захисту. Однак висока вартість таких опор суттєво обмежує їх застосування.

Останнім часом в конструкціях повітряних ліній електропередавання набувають застосування багатогранні металеві опори із гнутого металу, виконані в габаритах залізобетонних опор (див. рис. 1.14). Такі опори характеризуються простотою виготовлення та монтажу, компактністю, малою вагою тощо.

Ще один тип новітніх опор, що набувають застосування в світовій практиці будівництва повітряних ліній електропередавання, виготовляють із композитних матеріалів на базі скловолокна з полімерними сполучниками. Загальний вигляд такої опори показано, наприклад, на рис. 1.15. Опори з композитних матеріалів характеризуються довговічністю, гідрофобністю, ремонтпридатністю, невеликою вагою, легкістю монтажу та транспортування, простотою експлуатації та обслуговування, екологічністю та діелектричною міцністю.

За конструктивним виконанням розрізняють проміжні та анкерні опори. Проміжні опори встановлюють на прямих ділянках повітряних ліній. Такі опори призначені для підтримки проводів повітряної лінії з метою забезпечення нормованих габаритних відстаней між проводами лінії та землею. На рис. 1.12, наприклад, представлена проміжна залізобетонна опора повітряної лінії напругою 330 кВ.

Анкерні опори призначені для натягування проводів повітряної лінії з метою забезпечення нормованих значень тяжіння в матеріалі проводів лінії. Анкерні опори встановлюють на кінцях лінії, на кутах поворотів, на прямих ділянках для натягування проводів та забезпечення надійності механічної конструкції лінії, а також в місцях, передбачених нормами проє-



Рис. 1.15. Проміжна композитна опора повітряної лінії 110 кВ

ктування лінії, наприклад, для обмеження переходів лінії через електрифіковану залізницю. На рис. 1.14 представлена, наприклад, анкерна кінцева багатогранна металева опора повітряної лінії 110 кВ, а на рис. 1.13 – анкерна кутова опора повітряної лінії 35 кВ.

Крім зазначених в конструкціях повітряних ліній застосовують інші спеціальні типи опор, зокрема, кінцеві опори (див. рис. 1.16), які встановлюють по кінцях великих переходів для натягування проводів повітряної лінії; до кінцевих також відносять опори, які встановлюють на кінцевих підстанціях електропередачі (див. рис. 1.14); кутові опори (див. рис. 1.13), які встановлюють на кутах поворотів лінії; відпайкові опори (див. рис. 1.17), для створення вузлів робочої схеми електричної мережі без застосування розподільчих пристроїв; транспозиційні опори (див. рис. 1.18) для зміни чергування фазних проводів лінії у просторі; перехідні опори (див. рис. 1.19) для виконання переходів через водні простори тощо.



Рис. 1.16. Кінцева опора повітряної лінії 150 кВ



Рис. 1.17. Відпайкова опора
повітряної лінії 110 кВ



Рис. 1.18. Гранспозиційна опора повітряної лінії 110 кВ

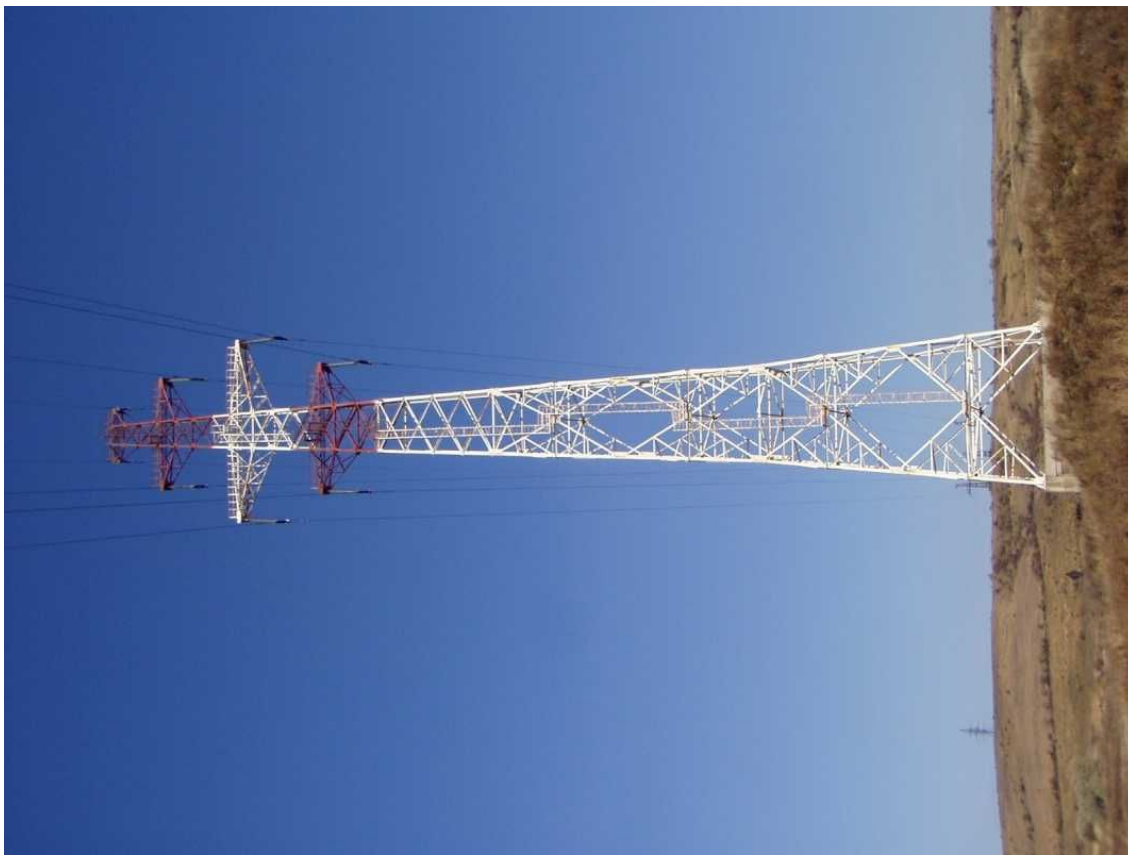
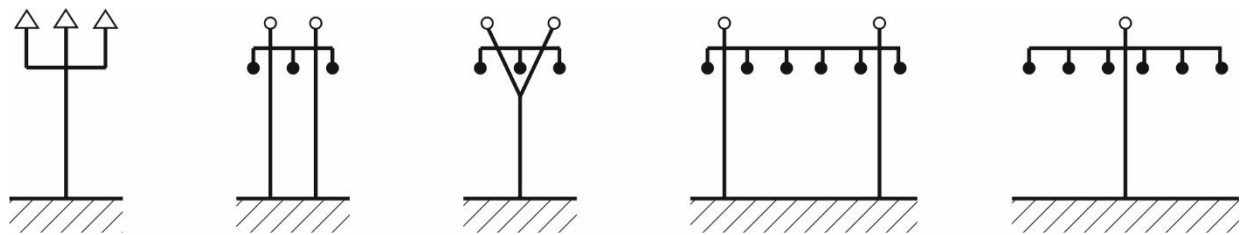


Рис. 1.19. Перехідна опора повітряної лінії 110 кВ

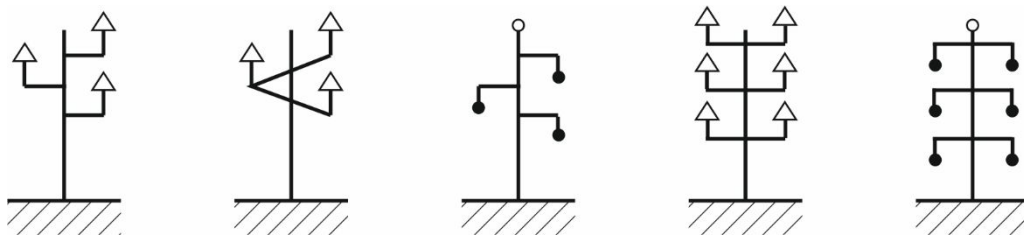
Зазначимо, що саме конструкція опори визначає геометричні властивості повітряної лінії електропередавання, зокрема, взаємне розташування фазних проводів у просторі і, як наслідок, надійнісні, економічні, електро-технічні параметри лінії тощо. На рис. 1.20 наведені типові конструкції розташування проводів на опорах повітряних ліній електропередавання.

Проводи на опорах можуть бути розташовані в один, два або три яруси [6, 34]. Розташування проводів в один ярус (див. рис. 1.20 а) називають горизонтальним. Така конструкція опор є найбільш надійною в районах інтенсивної ожеледі, оскільки така схема знижує ймовірність схрещування фазних проводів у разі нерівномірного відкладання ожеледі під час вітру. Горизонтальне розташування проводів забезпечує також надійну роботу лінії в районах інтенсивного галоупування проводів. Водночас опори з горизонтальним розташуванням проводів вимагають найширшої полоси землевідчуження, що негативно впливає на економічні показники конструкції повітряної лінії.

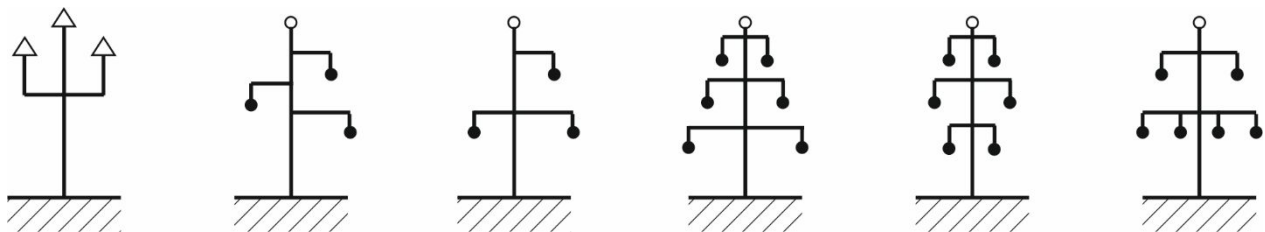
Вертикальним розташуванням називають розташування проводів у два або три яруси без горизонтального зсуву проводів, які знаходяться один над іншим (див. рис. 1.20 б). Вертикальне розташування проводів



а) горизонтальне розташування проводів



б) вертикальне розташування проводів



в) змішане розташування проводів

Рис. 1.20. Схеми розташування проводів на опорах

визначає найменшу надійність конструкції повітряної лінії електропередавання. Тому в Україні нормативні документи регламентують використання опор з вертикальним розташуванням проводів лише в конструкціях повітряних ліній з номінальною напругою до 35 кВ, оскільки для таких електропередач вимоги надійності є найслабшими. Водночас у світовій практиці в регіонах, де відсутні опади у вигляді ожеледі та галопування проводів опори з вертикальним розташуванням проводів набули широкого використання, оскільки вони вимагають мінімального землевідчуження, а, отже, визначають найкращі економічні показники конструкції повітряної лінії.

Розташування проводів в два або три яруси із горизонтальним зсувом проводів, які знаходяться один над одним, називають змішаним (див. рис. 1.20 в). Змішане розташування проводів на опорах забезпечує необхідний компроміс між забезпеченням надійності конструкції лінії та мінімізацією землевідчуження. До того ж розташування фазних проводів у вершинах трикутника забезпечує електричне симетрування електротехнічних параметрів лінії.

Накопичений багаторічний досвід проектування, будівництва та експлуатації повітряних ліній електропередавання дозволив визначити найбільш доцільні та економічні конструкції опор для кожного кліматичного та географічного району та реалізувати уніфікацію таких конструкцій. Водночас, застосування новітніх технологій у конструктивному виконанні повітряних ліній електропередавання визначає необхідність розробки нових типів опор.

Маркування опор повітряних ліній складається з літеро-цифрового коду. Перші літери такого коду позначають конструктивне виконання та матеріал опори:

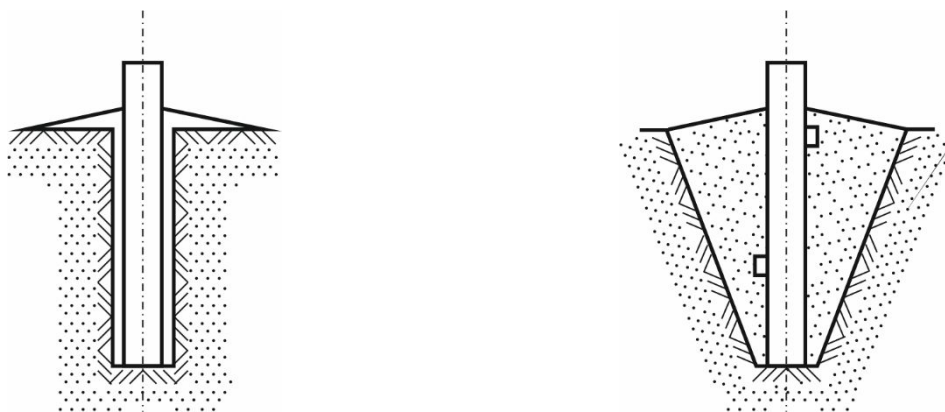
- П, ПС – проміжні опори;
- ПВС – проміжні опори з внутрішніми зв'язками;
- ПУ, ПУС – проміжні кутові опори;
- ПП – проміжні перехідні опори;
- А – анкерні опори;
- АУ, У, УС – анкерно-кутові опори;
- К, КС – кінцеві опори;
- Б – залізобетонні опори (крім опор ліній 500 кВ);
- відсутність Б – металеві опори;
- М – металеві багатогранні опори;
- ПК – проміжні композитні опори.

Цифри після літер позначають клас номінальної напруги лінії електропередавання. Наявність літери «т» у складі коду позначає тросостійку з двома тросами; літери «п» – зміну взаємного розташування проводів на опорі. Цифра через дефіс позначає типорозмір опори. При чому непарні цифри вказують на одноколові опори, а парні – на дво- та багатоколові

опори. Цифра після знаку «+» наприкінці коду опори позначає висоту приставки до базової опори (для металевих опор).

Наприклад, маркування опори У110-2+14 означає, що це металева анкерно-кутова двоколова опора з підставкою висотою 14 м для повітряної лінії 110 кВ; ПМ220-1 – проміжна металева багатогранна одноколова опора для повітряної лінії 220 кВ; У220-2т – металева анкерно-кутова двоколова опора з двома тросами для повітряної лінії 220 кВ; ПБ110-4 – проміжна залізобетонна двоколова опора для повітряної лінії 110 кВ; ПК110-1 – проміжна композитна одноколова опора для повітряної лінії 110 кВ.

Спосіб закріплення опор в ґрунті визначається низкою факторів, зокрема – конструкцією опори та характеристиками ґрунту [11, 12]. Деякі типи опор, наприклад, проміжні дерев'яні та залізобетонні опори встановлюють без фундаменту безпосередньо в ґрунт, як показано на рис. 1.21. Фундаментом тут виступає нижня частина стійкої опори, яка може бути посилена ригелями. Глибина закладання опори в цьому разі визначається категорійністю ґрунту та типом опори.



а) у пробурений котлован

б) у виритий котлован з ригелями

Рис. 1.21. Способи установки опор без фундаментів

Для закріплення в ґрунті металевих опор, зазвичай, використовують заздалегідь підготовлені залізобетонні фундаменти. Такі фундаменти виготовляють в заводських умовах та доставляють на будівництво ліній електропередавання. За конструктивним виконанням фундаменти опор поділяють на монолітні, збірні та пальові.

Конструкція монолітних та збірних фундаментів опор представлена на рис. 1.22. Такі фундаменти складаються з опорної плити, стійки та анкерного болта. Єдина різниця між монолітними та збірними фундаментами полягає в тому, що збірні фундаменти складаються із окремих деталей, які збирають в єдину конструкцію безпосередньо на місці будівництва. Зазначимо, що основним недоліком монолітних фундаментів є велика витрата матеріалів та часу на їх виготовлення, що визначає більшу вартість таких конструкцій. Разом з тим фізико-механічні характеристики монолітних



а) прямий фундамент

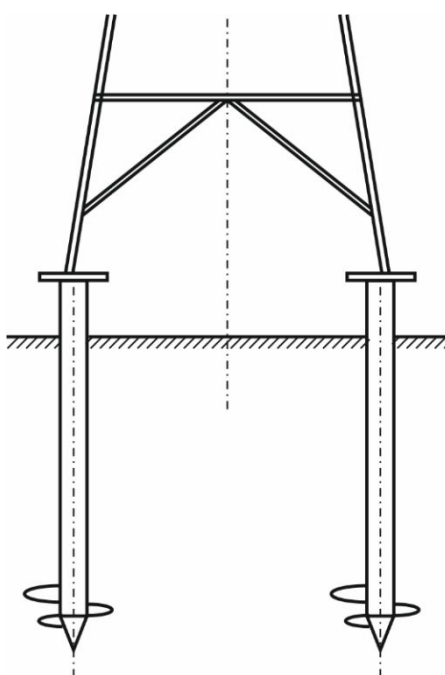


б) похилий фундамент

Рис. 1.22. Монолітні та збірні фундаменти опор

фундаментів, зазвичай, кращі, ніж збірних. Тому застосування монолітних фундаментів потребує техніко-економічного обґрунтування доцільності такої конструкції лінії.

Пальові фундаменти призначені для закріплення в ґрунті залізобетонних опор а відтяжках та металевих опор різних конструкцій. У ґрунт палі встановлюють за допомогою спеціальних вібруючих пристроїв, що дозволяє підвищити рівень механізації та суттєво зменшити обсяги земельних

**Рис. 1.23.** Закріплення опори на гвинтових палях

робіт під час будівництва. В конструкціях повітряних ліній електропередавання для виготовлення пальових фундаментів, зазвичай, використовують палі квадратного перетину та гвинтові палі. На рис. 1.23 представлено спосіб закріплення в ґрунті металевої опори баштового типу на гвинтових палях.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає призначення опор повітряних ліній електропередавання?
2. Перелічіть основні вимоги, які висувають до конструкцій опор повітряних ліній електропередавання.
3. Перелічіть основні конструктивні складові опор повітряних ліній електропередавання.
4. Перелічіть основні матеріали, які використовують для виготовлення опор повітряних ліній електропередавання.
5. Наведіть характеристики дерев'яних, залізобетонних, металевих решітчастих та багатогранних, а також композитних опор повітряних ліній.
6. Наведіть класифікацію конструктивного виконання опор.
7. Поясніть призначення проміжних та анкерних опор повітряних ліній електропередавання.
8. Перелічіть та охарактеризуйте спеціальні типи опор.
9. Перелічіть та охарактеризуйте схеми закріплення проводів на опорах.
10. Зазначте основні принципи маркування опор повітряних ліній електропередавання.
11. Перелічіть та охарактеризуйте способи закріплення опор в ґрунті.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 14-19; [16], с. 7-9; [17], с. 31-44; [29], с. 27-36; [34], с. 119-121; [63], с. 72-82; [64], с. 41-50.

1.4. ІЗОЛЯТОРИ ТА ЛІНІЙНА АРМАТУРА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Лінійні ізолятори призначені для ізоляції проводів повітряної лінії, які знаходяться під дією високої напруги, від металевих елементів конструкцій опор [22]. Основна особливість ізоляторів повітряних ліній полягає в тому, що вони випробують одночасну дію високої електричної напруги та великих механічних навантажень, що визначає основні вимоги до конструктивного виконання ізоляторів повітряних ліній [34]. До таких вимог відносять високу електричну та механічну міцність, малу вагу, стійкість до атмосферних впливів, зручність експлуатації та економічність.

Для виготовлення ізоляторів використовують електротехнічний фарфор, загартоване електротехнічне скло та синтетичні композитні полімери. В табл. 1.4 зведена основна інформація про фізико-технічні властивості матеріалів, які використовують для виготовлення лінійних ізоляторів.

Таблиця 1.4. Фізико-технічні властивості матеріалів,
з яких виготовляють лінійні ізолятори

| Параметр | Фарфор | Скло | Полімер |
|----------------------------------|--------------------|-----------|---------------------------------------|
| Густина, кг/м ³ | 2300–2500 | 2500 | 1100–1600 |
| Міцність на розрив, МПа | 90 | 90 | 4–6 |
| Електрична міцність, кВ/мм | 25–30 | 48 | 18–24 |
| Тангенс кута діелектричних втрат | 0,02 | 0,024 | $5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ |
| Питомий об'ємний опір, Ом·м | 10^{11} | 10^{12} | 10^{12} – 10^{13} |
| Питомий поверхневий опір, Ом | 10^9 – 10^{12} | 10^{14} | 10^{12} – 10^{14} |
| Діелектрична проникність | 2,9–3,6 | 7 | 7 |

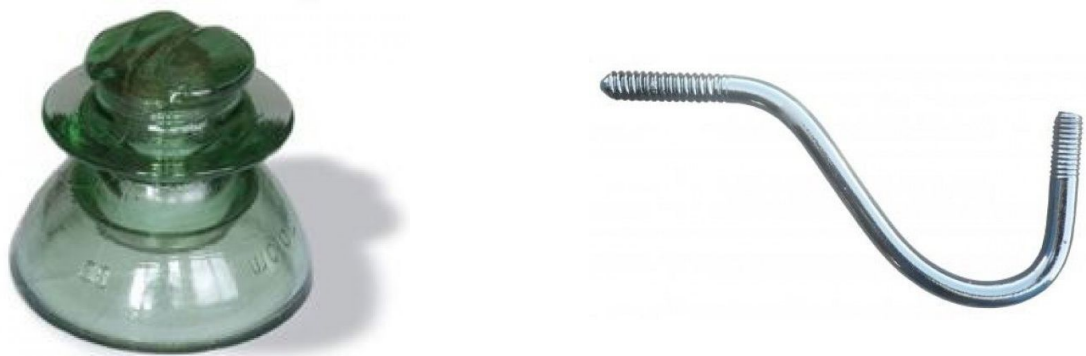
Електротехнічний фарфор є штучним мінералом, виготовленим з глинистих мінералів, польового шпату та кварцу шляхом термообробки за керамічною технологією. До найбільш цінних його властивостей відносять високу стійкість до атмосферних впливів, перепадів температур, впливу хімічних реагентів, високі механічна і електрична міцність, дешевизна вихідних компонентів.

Електротехнічне скло являє собою аморфну речовину, що складається з оксидів натрію, бору, кальцію, кременю, алюмінію тощо. Електротехнічне скло є малолужним, не розтріскується та не мутніє протягом експлуатації. Порівняно із фарфоровими, виготовлення ізоляторів з електротехнічного скла характеризується більш надійною сировинною базою та простішою технологією, яка дозволяє повністю автоматизувати технологічний процес. Крім того, в процесі експлуатації, у разі пробою скляні ізолятори, на відміну від фарфорових, повністю руйнуються, що дозволяє організувати візуальний контроль несправних ізоляторів. Головний недолік технологічного процесу виготовлення скляних ізоляторів полягає у високій енергоємності виробництва.

Останнім часом в конструкціях повітряних ліній електропередавання широкого поширення набули полімерні ізолятори, виготовлені із композитних матеріалів на базі кремнійорганічної гуми. Кремнійорганічну гуму отримують шляхом вулканізації каучуку за допомогою радіаційного опромінювання або хімічних агентів за високої температури. Така речовина характеризується низькою механічною міцністю та недостатньою світло- та озоностійкістю. Для забезпечення необхідних властивостей до гуми додають активний посилюючий наповнювач, який складається з нанопорошків

двоокисів титану та кремнію. В результаті отримують матеріал для виготовлення ізоляторів ліній електропередавання, що характеризується достатньою механічною міцністю, дуже малою вагою та володіє відмінними діелектричними властивостями.

За конструктивним виконанням розрізняють штирові, опорні та підвісні ізолятори. Штирові ізолятори складаються з ізоляційної деталі, яка закріплюється на штирі або гаку опори. Загальний вигляд штирового ізолятора та гаку для його закріплення представлено на рис. 1.24. Такі ізолятори призначені для використання лініях електропередавання розподільчих мереж напругою до 35 кВ. Штирові ізолятори виготовляють з фарфору або з електротехнічного скла.



а) штировий скляний ізолятор
ШС-10Д

б) гак для закріплення штирового
ізолятора К-22

Рис. 1.24. Конструкція штирових ізоляторів

Останнім часом в конструкціях повітряних ліній із захищеними проводами широкого застосування набувають лінійні опорні ізолятори, зовнішній вигляд яких представлено на рис. 1.25. Конструктивно такі ізолятори виконані у вигляді стрижня із фарфорового або полімерного тіла та металевої арматури.

Підвісні ізолятори утворюють ізоляційні підвіси – пристрої, які складаються з одного або кількох підвісних ізоляторів і лінійної арматури, шарнірно з'єднаних між собою. Такі ізолятори використовують в лініях електропередавання напругою 35 кВ та вище. Підвісні ізолятори поділяють на гірлянди тарілчастих ізоляторів та стрижневі ізолятори.

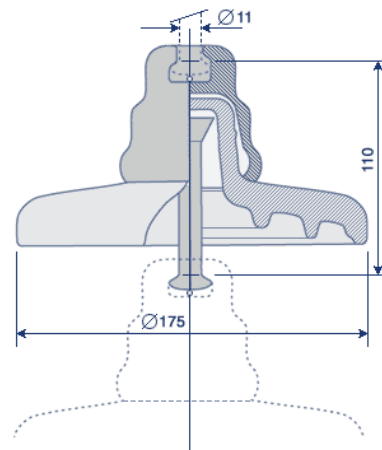
Гірлянди ізоляторів збирають з тарілчастих ізоляторів, виготовлених з фарфору або електротехнічного скла. Загальний вигляд тарілчастого ізолятора наведено на рис. 1.26 а. На рис. 1.26 б схематично показано спосіб поєднання тарілчастих ізоляторів в гірлянду. Кількість ізоляторів в підвісі визначається номінальною напругою лінії електропередавання, ступенем забрудненості атмосфери, матеріалу опор та типу ізоляторів.



Рис. 1.25. Опорні лінійні ізолятори ОЛСК (ліворуч) та ОЛФ (праворуч)



а) зовнішній вигляд



б) схема поєднання в гірлянді

Рис. 1.26. Тарілчастий ізолятор типу ПС-40

Стрижневі ізолятори виготовляють з композитних полімерів на базі кремнійорганічної гуми. Загальний вигляд стрижневого полімерного ізолятора наведено на рис. 1.27. Такі ізолятори дорожче за гірлянди тарілчастих ізоляторів. Проте вони характеризуються кращими електрофізичними властивостями та значно меншою вагою, що зумовлює широкі перспективи використання полімерних ізоляторів в конструкціях повітряних ліній електропередавання всіх класів номінальної напруги.

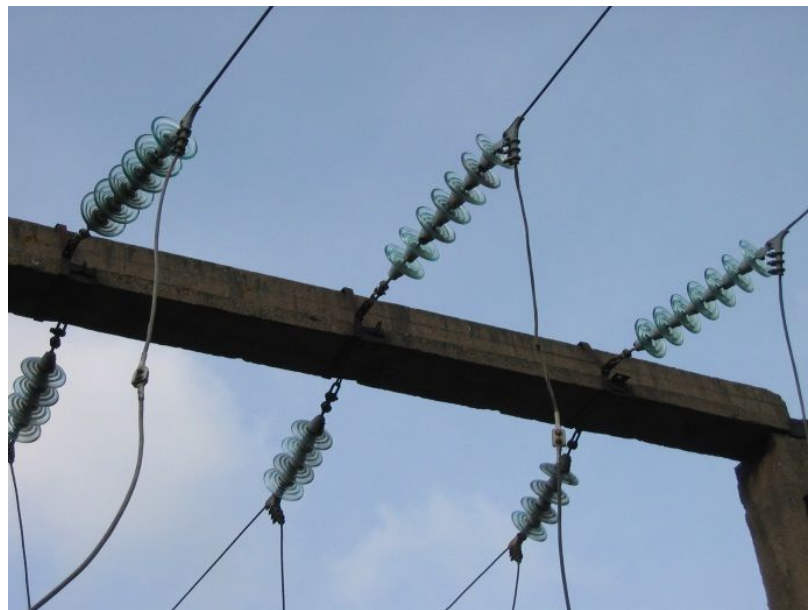


Рис. 1.27. Полімерний стрижневий ізолятор типу ЛК 70/110-III

За способом закріплення на опорах ізоляційні підвіси поділяють на підтримуючі та натяжні. Підтримуючі підвіси призначені для підтримки проводів над поверхнею землі та несуть навантаження лише від ваги проводу у прогоні, їх закріплюють на проміжних опорах повітряної лінії, як показано, наприклад, на рис. 1.28 *а*. Натяжні підвіси призначені для натягу проводів в прогонах, отже, додатково сприймають навантаження від натягу проводів на опорах анкерного типу (див. рис. 1.28 *б*).



а) підтримуючий підвіс



б) натяжний підвіс

Рис. 1.28. Підтримуючі та натяжні ізоляційні підвіси

Інколи для забезпечення необхідної механічної міцності конструкції ізоляційні підвіси комплектують із декількох паралельних ланцюгів гірлянд підвісних ізоляторів або стрижневих ізоляторів. Так, наприклад, на рис. 1.28 *а* показано дволанцюговий підтримуючий ізоляційний підвіс повітряної лінії напругою 750 кВ.

Маркування лінійних ізоляторів вітчизняного виробництва складається з літеро-цифрового коду [22]. Перша літера коду визначає тип ізолятора:

- Ш – штировий лінійний ізолятор;

- Н – штировий низьковольтний ізолятор;
- П – підвісний тарілчастий ізолятор;
- О – опорний ізолятор;
- Л – лінійний стрижневий ізолятор.

Друга літера визначає матеріал, з якого виготовлено ізолятор:

- Ф – електротехнічний фарфор;
- С – загартоване скло;
- К – композитний полімер.

Підвісні тарілчасті ізолятори можуть додатково мати третю літеру, яка означає модифікацію конструкції спеціальних ізоляторів:

- Г – брудостійкий;
- Д – двокрилий;
- К – із конічною ізоляційною деталлю;
- С – із сферичною ізоляційною поверхнею;
- В – із витягнутим униз ребром.

Цифровий код лінійних ізоляторів відповідно до їх типу означає:

- для низьковольтних штирових ізоляторів – діаметр внутрішньої різьби;
- для високовольтних штирових ізоляторів – клас номінальної напруги у кіловольтах;
- для тарілчастих підвісних ізоляторів – гарантовану механічну міцність, виражену у кілоньютонах;
- для стрижневих полімерних ізоляторів перша цифра – гарантована механічна міцність, друга – клас номінальної напруги.

Літера наприкінці коду штирових та тарілчастих ізоляторів є індексом модернізації ізолятора. Римська цифра наприкінці маркування полімерних ізоляторів є кодом гранично допустимого ступеню забруднення ізолятора.

Наприклад, маркування ізолятора ШФ-10Б означає, що це штировий лінійний ізолятор, виготовлений з електротехнічного фарфору для ліній електропередавання напругою 10 кВ, типорозмір якого визначається модернізацією за кодом Б. Маркування ізолятора ЛК-120/110-III означає, що це лінійний полімерний ізолятор для ліній електропередавання напругою 110 кВ. Руйнівне механічне навантаження складає 120 кН. Гранично допустимий ступінь забруднень ізолятора III.

Для монтажу повітряних ліній електропередавання використовують спеціальну лінійну арматуру [26, 34]. За своїм призначенням її поділяють на групи:

1. Зчеплювальна арматура, призначена з'єднання елементів ізоляційних підвісок, а також для їх прикріплення до опор повітряних ліній. До зчеплювальної арматури відносять, наприклад, серги, вушка, скоби, представлені на рис. 1.29 тощо.



а) серьга типу СРС



б) вушко типу УСК



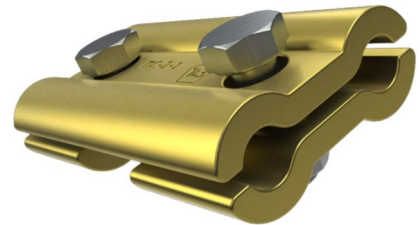
в) скоба типу СК

Рис. 1.29. Зчеплювальна лінійна арматура

а) затискач пресований типу САС



б) затискач перехідний типу ПАС



в) затискач плашковий типу ПС

Рис. 1.30. З'єднувальна лінійна арматура

а) затискач підтримуючий глухий типу ПГН



б) затискач підтримуючий глухий типу 2ПГН



в) затискач підтримуючий глухий типу ПГУ

Рис. 1.31. Підтримуюча лінійна арматура

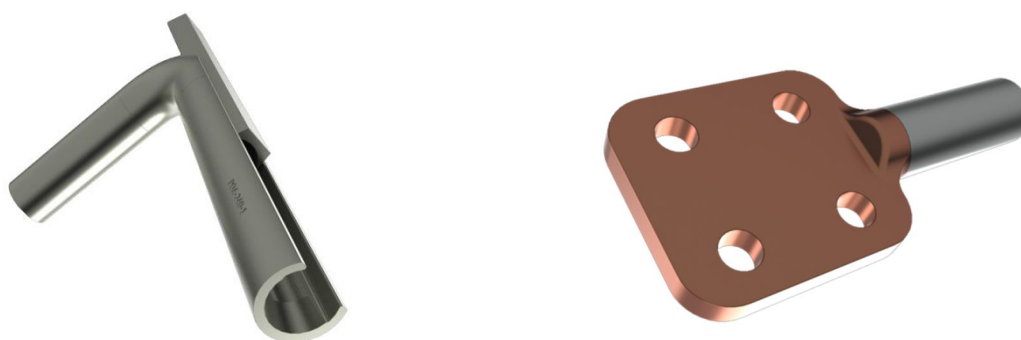


а) затискач натяжний
болтовий НБ

б) затискач натяжний
клиновидний типу НК-
1-1

в) затискач натяжний
коушний типу НКК

Рис. 1.32. Натяжна лінійна арматура



а) затискач роз'ємний відгалужу-
вальний пресований типу РОА

б) затискач апаратний пресований
типу А4А

Рис. 1.33. Контактна лінійна арматура



а) трипроменева дистанційна
розпорка типу ЗРГ

б) гасник вібрації типу РПГ

Рис. 1.34. Захисна лінійна арматура



в) кільце захисного екрану типу ЕЗ



г) баласт типу БП

Рис. 1.35. Захисна лінійна арматура



Рис. 1.36. Лінійна арматура для самоутримних ізольованих проводів

2. З'єднувальна арматура, призначена для з'єднання окремих частин проводу під час монтажу. До з'єднувальної арматури відносять спеціальні затискачі різного типу, представлені, наприклад, на рис. 1.30.
3. Підтримуюча арматура, призначена для закріплення фазних проводів та грозозахисних тросів в затискачах для подальшого прикріплення до ізоляційної підвіски. До підтримуючої арматури відносять, наприклад, підтримуючі затискачі та роликові підвіси, представлені на рис. 1.31 тощо.

4. Натяжна арматура, призначена для закріплення проводів та тросів на натяжних підвісах анкерних та анкерно-кутових опор. На рис. 1.32 представлені типові конструкції натяжних затискачів.
5. Контактна арматура, призначена для організації відгалужень від проводів повітряних ліній та приєднання проводів до затискачів електричних апаратів. На рис. 1.33 представлені типові елементи контактної арматури.
6. Захисна арматура, призначена для забезпечення нормованих відстаней між проводами розщепленої фази захисту проводів повітряної ліній від вібрації, для вирівнювання електричного поля навколо гірлянд ізоляторів, для захисту ізоляторів від птахів тощо. На рис. 1.34 та 1.35 представлені типові елементи захисної арматури.

Часто, як окремий тип розглядають лінійну арматуру, призначену для повітряних ліній з захищеними проводами, укомплектованих самоутримними ізольованими проводами. На рис. 1.36 наведено деякі елементи лінійної арматури для самоутримних ізольованих проводів.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає призначення лінійної ізоляції?
2. Перелічіть основні вимоги до лінійних ізоляторів.
3. Які матеріали, які використовують для виготовлення лінійних ізоляторів.
4. Наведіть класифікацію лінійних ізоляторів за конструктивним виконанням.
5. Дайте визначення ізоляційного підвісу.
6. Дайте характеристику штирових, підвісних тарілчастих та стрижневих полімерних ізоляторів.
7. Наведіть принципи маркування лінійних ізоляторів.
8. У чому полягає призначення лінійної арматури.
9. Наведіть класифікацію лінійної арматури за призначенням.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[29], с. 36-41; [31], с. 28-43; [34], с. 69-81; [63], с. 82-89; [64], с. 35-40.

1.5. ХАРАКТЕРИСТИКА КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Повітряні лінії електропередавання знаходяться під постійним активним впливом навколишнього середовища. Це визначає зміну механічних навантажень та впливів на конструктивні елементи повітряних ліній протягом періоду експлуатації внаслідок зміни кліматичних умов в районі траси лінії. Найбільший вплив на механічні навантаження конструктивних елементів повітряних ліній чинять наступні кліматичні фактори: температура оточуючого повітря, натиск вітру, відкладення ожеледі [1 – 3, 42, 45, 52 – 56, 65]. Кліматичні умови для розрахунків конструктивних елементів повітряних ліній визначають за характеристичними значеннями навантажень та впливів.

Температура оточуючого повітря змінюється протягом року в дуже широкому діапазоні. Внаслідок теплового лінійного розширення, в режимах найбільших температур провід здовжується, механічне напруження в його матеріалі зменшується, а стріла провисання збільшується. За таких умов можливе порушення нормованої габаритної відстані між проводом лінії та землею, або інженерним спорудженням. Навпаки, в режимах найнижчих температур довжина проводів скорочується, механічне напруження в його матеріалі збільшується, а стріла провисання зменшується. За таких умов тяжіння в матеріалі проводу може перевищити свої гранично допустимі значення.

Для розрахунку механічних навантажень у конструктивних елементах повітряної лінії розглядають наступні характеристичні значення температурних режимів оточуючого повітря:

- 1) максимальна температура – середньостатистична максимальна півгодинна температура протягом року, зафіксована метеостанцією в районі проходження траси лінії;
- 2) мінімальна температура – середньостатистична мінімальна півгодинна температура протягом року, зафіксована метеостанцією в районі проходження траси лінії;
- 3) середньорічна температура – середньозважена за тривалістю температура протягом року в районі проходження траси лінії;
- 4) температура під час ожеледі – температура повітря в режимі утворення максимальних відкладень ожеледі на конструктивних елементах повітряної лінії. Для умов України така температура, зазвичай, дорівнює -5°C ;
- 5) температура вітрового режиму – температура повітря у режимі найбільшого навантаження від натиску вітру. Для умов України така температура, зазвичай, дорівнює температурі під час максимальної ожеледі;

- б) температура грозового періоду – середньостатистичне значення найменшої температури, за якої спостерігається грозова активність. Для умов України така температура, зазвичай, дорівнює $+15^{\circ}\text{C}$.

Відкладення ожеледі, паморозі і мокрого снігу на конструктивних елементах повітряних ліній є неоднорідними, мають різну форму та густину. Розрізняють такі види ожеледно-паморозевих відкладень:

- ожеледь – осад прозорого або шрамованого льоду високої густини. Утворюється за температури в межах від 0 до -3°C та відкладається переважно з навітряного боку проводу, але можливі відкладення по всій поверхні проводу і міцно тримається на проводі;
- зерниста паморозь – осад білого кольору, що нагадує сніг. Утворюється за температури повітря в межах від -3°C до -10°C шляхом намерзання на проводі крапель переохолодженого туману та мряки. Міцно тримається на проводі та не спадає навіть за сильного вітру та під час розгойдування проводу;
- кристалічна паморозь – білий осад, що складається з кристалів льоду ніжної тонкої структури, яка нагадує іній. Утворюється за температури в діапазоні від -10°C до -40°C шляхом сублімації випаровування води та відкладається з навітряного боку проводу. Відрізняється високою крихкістю та дуже слабо тримається на проводах, осипаючись під натиском вітру або під час струшування;
- суміш – складні відкладення, що складаються із нашарувань ожеледних та паморозевих відкладень, обумовлених частою зміною погодних умов та температури в діапазоні від 0 до -20°C . Змішані утворення міцно тримаються на проводах та будівельних конструкціях повітряних ліній;
- мокрий сніг зовнішньо не відрізняється від звичайного, але характеризуються підвищеною липкістю. Спостерігається за температури повітря біля 0°C . Тримається на проводах не міцно, легко спадає після струшування або розгойдування проводу. Однак, у разі подальшого зниження температури сніг замерзає та перетворюється на лід, який міцно тримається на проводі.

В табл. 1.5 представлено характеристики метеорологічних умов утворення відкладень ожеледі різних типів. Найхарактерніші форми відкладень ожеледі та загальний вигляд проводу, вкритого такими відкладеннями представлено на рис. 1.37 та 1.38 відповідно. Очевидно, що відкладення ожеледі задають істотні додаткові навантаження на конструктивні елементи повітряних ліній, які обумовлюють збільшення тяжіння проводу та його стріли провисання. Відкладення ожеледі, особливо в поєднанні з дією вітру, часто призводять до значних аварій, пов'язаних з обривом проводів та руйнуванням опор повітряних ліній, що призводить до знеструмлення споживачів протягом значного періоду часу (див. рис. 1.39) [31].

Таблиця 1.5. Характеристики метеорологічних умов утворення відкладень ожеледі

| Тип відкладень | Температура повітря, °С | Швидкість вітру, м/с | | Атмосферні явища |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------|---------------------------|
| | | Середня | Максимальна | |
| Ожеледь | 0...–4 | 0...15 | 40 | Дощ, туман, мряка |
| Зерниста паморозь | –3...–10 | 1...15 | 40 | Туман, мряка |
| Кристалічна паморозь | –10...–40 | 0...3 | 5...7 | Туман, димка |
| Суміш | 0...–20 | 1...15 | 30...40 | Мокрий сніг, туман, мряка |
| Мокрий сніг | +1...–2 | 0...10 | 20...30 | Мокрий сніг |

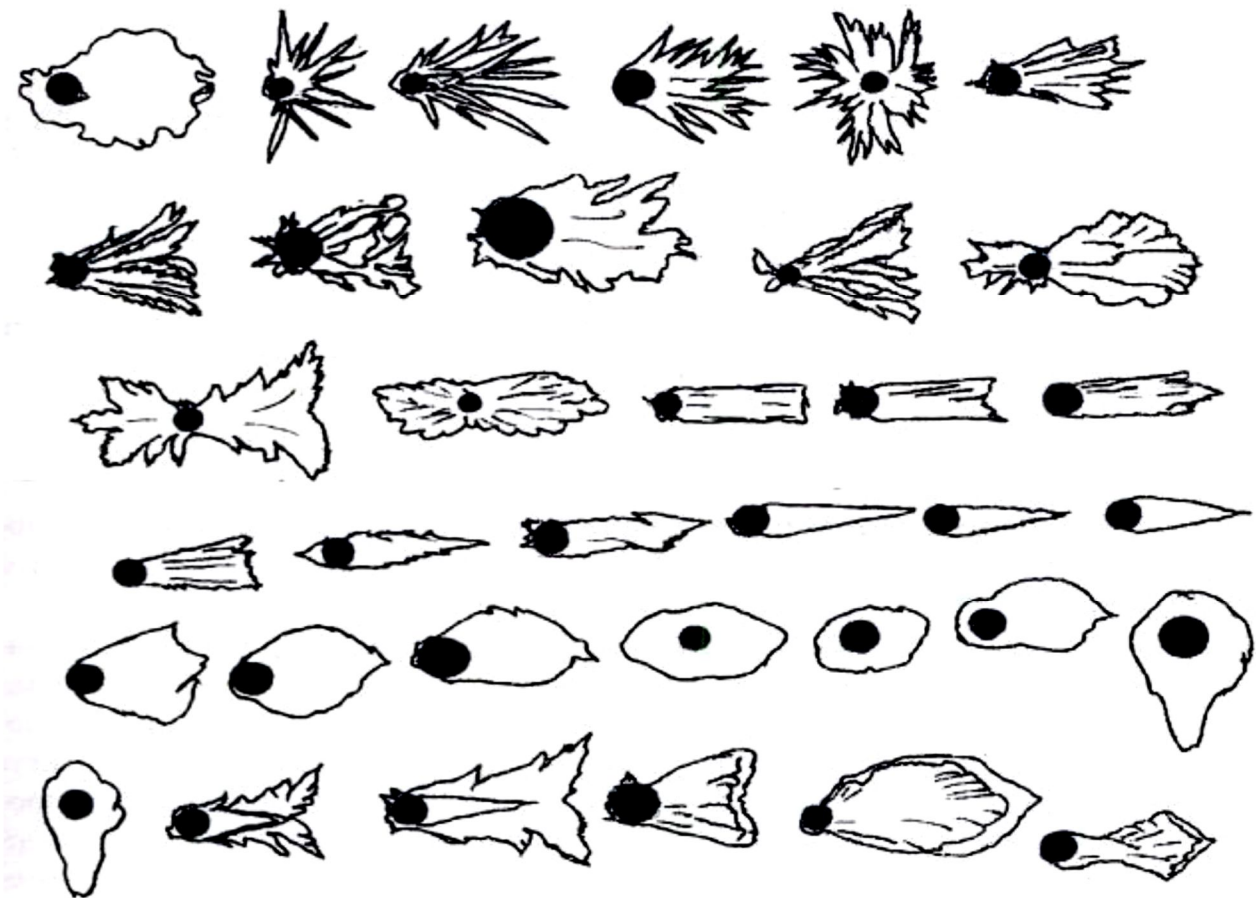


Рис. 1.37. Найхарактерніші форми відкладень ожеледі на проводах



Рис. 1.38. Відкладення ожеледі на проводах повітряної лінії

а)



б)



в)



Рис. 1.39. Аварії на ЛЕП, пов'язані із ожеледдю та вітром

Натиск вітру на конструктивні елементи повітряних ліній створює на них горизонтальні механічні навантаження. Під час виконання механічних розрахунків враховують такі дії вітру на конструктивні елементи повітряних ліній електропередавання [47]:

- навантаження від максимального натиску вітру без ожеледі на всі елементи повітряної лінії;
- навантаження від натиску вітру на крупногабаритні елементи повітряної лінії;
- навантаження від натиску вітру під час ожеледі на проводи, троси та елементи опор кругового поперечного перетину діаметром до 70 мм.

Натиск вітру задає додаткове навантаження на конструктивні елементи повітряної лінії, які обумовлюють збільшення тяжіння проводу та відхилення площини стріли провисання проводу від вертикалі. Такі відхилення, зазвичай, відбуваються несинхронно, що зумовлює наближення фазних проводів у просторі. Натиск вітру, особливо в поєднанні з ожеледними навантаженнями, може призвести до суттєвих аварійних відключень, пов'язаних з обривом проводів та ламанням опор, що призводить до знеструмлення споживачів протягом значного періоду часу (див. рис. 1.39). Крім того, вітрові навантаження можуть збуджувати коливання проводів, які призводять до розкручення проволочок зовнішніх повивів проводів, виходу проводів із затискачів тощо.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Поясніть фізичний зміст впливу температури повітря на проводи повітряної лінії.
2. Перелічіть та дайте визначення характеристичних значень температури повітря в розрахунках механічних навантажень на конструктивні елементи повітряної лінії.
3. Дайте визначення ожеледних опадів та поясніть фізичний зміст їх впливу на конструктивні елементи повітряних ліній електропередавання.
4. Поясніть фізичний зміст впливу вітру на конструктивні елементи повітряних ліній електропередавання.

1.6. КОЛИВАННЯ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Натягнуті проводи повітряної лінії можна розглядати як струни, які під дією змінних зовнішніх збурень починають коливатися. Загалом розрізняють п'ять видів коливань проводів, які можуть збуджуватись в період експлуатації повітряної лінії [1, 2, 3, 31, 41, 42]:

- 1) еолова вібрація;
- 2) галопування;
- 3) субколивання;
- 4) коливання після скидання ожеледі;
- 5) коронне галопування.

Збудником перших трьох видів коливань (вібрації, галопування та субколивань) є вітер (див. рис. 1.40).

Виникнення вібрації проводів проілюстровано на рис. 1.41. Під час обтікання проводів (тросів) потоком повітря, спрямованим впоперек або під деяким кутом до вісі лінії, з підвітряного боку проводу виникають завихрення (див. рис. 1.41 *а*). Періодично відбуваються відриви завихрень вітру від проводу та утворення вихорів протилежного напрямку, а з підвітряного боку проводу утворюється вихрова доріжка Кармана (див. рис. 1.41 *б*). Це обумовлює появу вертикальної складової тиску вітру і, у разі збігу частоти утворень завихрень з однією з власних частот коливань натягнутого проводу, він починає коливатися у вертикальній площині, що умовно проілюстровано на рис. 1.41 *в*. Такі коливання називають еоловою вібрацією, або просто вібрацією.

Вібрація характеризується коливаннями з частотою від 3 до 150 Гц. При цьому в прогоні встановлюються стоячі хвилі з амплітудою, яка не перевищує діаметр проводу та довжиною напівхвиль 1–30 м. Вібрація спостерігається за швидкості вітру в діапазоні від 0,6 до 7 м/с. За подальшого збільшення швидкості вітру амплітуда вібрацій значно зменшується. Крім того, вібрація спостерігається за довжині прогону не менше 120 м та із збільшенням довжини прогонів посилюється. Основна небезпека вібрації полягає в розкручуванні зовнішніх повивів та обривах окремих проволок проводів, виходу проводів із затискачів тощо. На рис. 1.42 представлені проводи та троси, пошкоджені внаслідок виникнення вібрації.

Збудником галопування проводів також є вітер. Зазвичай, галопування проводів спостерігається під час ожеледі. Ожеледь відкладається на проводах переважно з підвітряного боку, внаслідок чого провід отримує неправильну форму і під впливом вітру може виникнути підйомна сила, яка обумовлює галопування проводів. Виникнення галопування проводів проілюстровано на рис. 1.43.

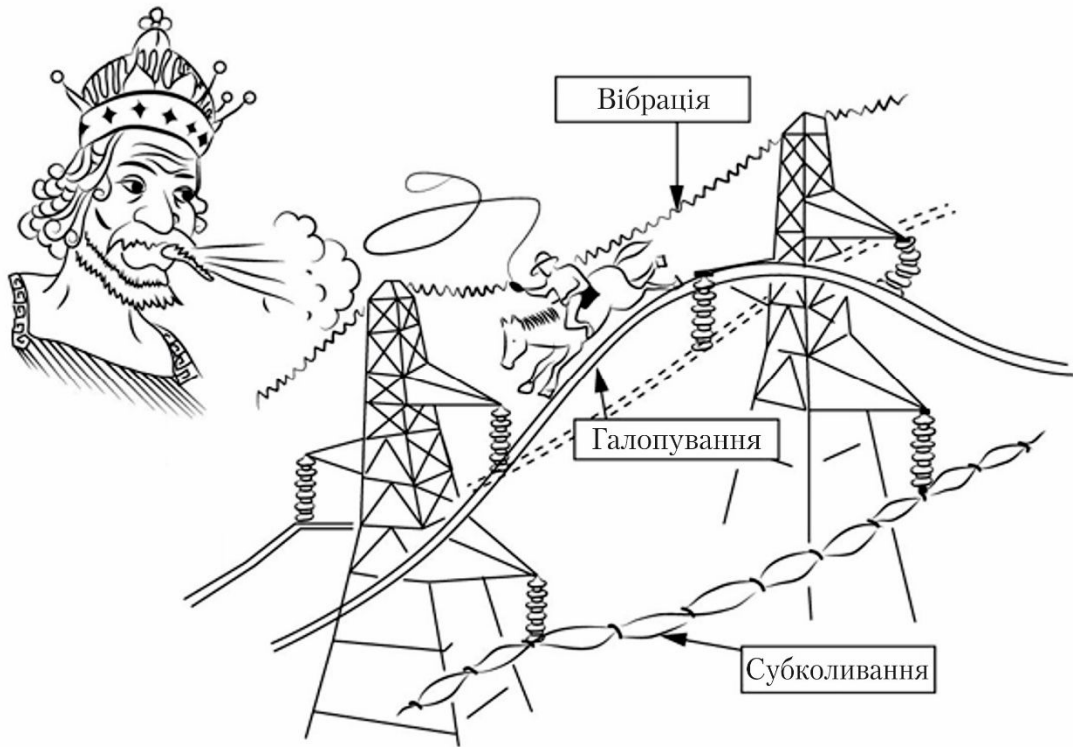
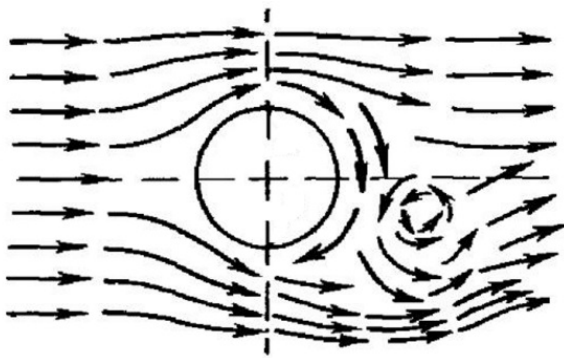


Рис. 1.40. Ілюстрація аеродинамічних коливань проводів повітряних ліній



а) утворення завихрень



б) вихрова доріжка Кармана



в) еолова вібрація проводу

Рис. 1.41. Ілюстрація виникнення вібрації проводів повітряних ліній



Рис. 1.42. Проводи, пошкоджені через вібрацію

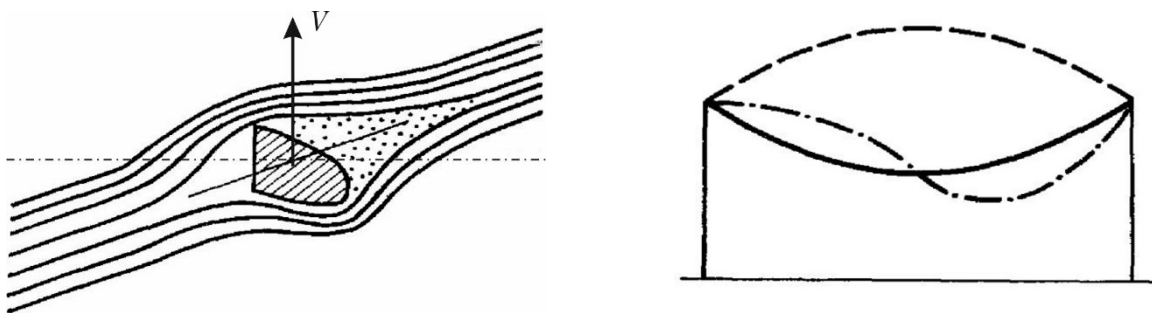


Рис. 1.43. Ілюстрація виникнення галопування проводів повітряних ліній

Галопування є низькочастотними коливаннями проводів (тросів) із частотою 0,08–3 Гц, які утворюють стоячі хвилі (інколи, у сполученні з біжучими) з числом на півхвиль у прогоні від однієї до двадцяти та амплітудою 0,3–5 м. Основна небезпека галопування полягає в тому, що коливання проводів окремих фаз та грозозахисних тросів відбуваються не синхронно, внаслідок чого може виникнути неприпустиме зближення проводів або вони, навіть, можуть схлиснути між собою. За середньою частотою повторюваності та інтенсивністю галопування проводів та тросів територія України поділяється на райони з помірним галопуванням проводів із середньою частотою повторюваності галопування один раз на п'ять років і менше і з частим і інтенсивним галопуванням проводів із середньою частотою повторюваності більше одного разу на п'ять років.

В лініях електропередавання надвисокої номінальної напруги з розщепленими проводами фази під дією вітру можуть виникати субколивання проводів – коливання приводів на ділянках між дистанційними розпірками, пов'язані з екрануванням одного з проводів іншим під час впливу

вітру на проводи, розташовані в одній горизонтальній площині. Якщо вітер направлений перпендикулярно до вісі лінії, один з проводів розщепленої фази знаходиться в аеродинамічному сліді іншого. Зміна аеродинамічної підйомної сили та лобового опору викликає нестійкий стан заднього проводу і він починає коливатися. Такі коливання є самозбуджуваними та розвиваються з частотою, яка дорівнює або близька до власної частоти коливань проводу. Виникнення субколивань проводів розщепленої фази проілюстроване на рис. 1.44, де a – крок розщеплення фазного проводу; d – діаметр проводу; $\pm\alpha$ – кут, на який відхиляється провід в аеродинамічному сліді.

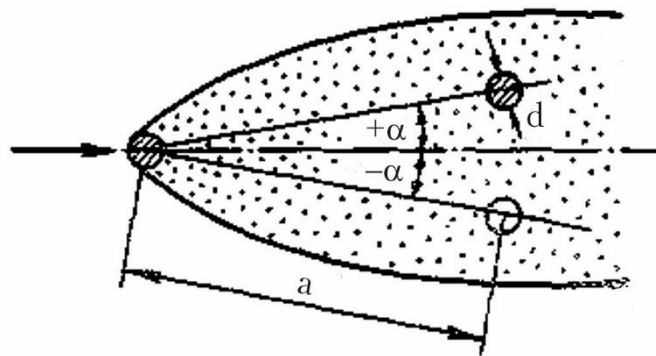


Рис. 1.44. Ілюстрація субколивань проводів повітряних ліній

Інтенсивні субколивання відбуваються за швидкості вітру 4-15 м/с. Із збільшенням кількості проводів в пучку спостерігається тенденція розвитку інтенсивних субколивань за більших швидкостях вітру.

В табл. 1.6 представлено порівняльні характеристики коливань проводів, обумовлених дією вітру.

Ще два види коливання проводів повітряних ліній не пов'язані з дією вітру. Перший з них зумовлений скиданням ожеледі. Відомо, що під дією відкладень ожеледі провід розтягується і механічне напруження в ньому збільшується. Якщо під час плавлення ожеледі, або внаслідок відлиги спостерігається різке скидання ожеледі на великій ділянці лінії, енергія деформації проводу вивільняється та переходить в кінетичну енергію руху проводу, що супроводжується його підскоком. Підскочок відбувається в основному у вертикальній площині та супроводжується швидко згасаючими коливаннями проводу. Амплітуда підскоку проводу залежить від довжини прогону, тяжіння проводу та ваги ожеледі, яка скидається. Виникнення коливань, зумовлених скиданням ожеледі проілюстровано на рис. 1.45, де індексом 1 показано положення проводу, вкритого ожеледдю; 2 – провід, який вібрує після скидання ожеледі. Головна небезпека таких коливань пов'язана з тим, що проводи та троси повітряної лінії можуть схлиснути між собою.

Таблиця 1.6. Характеристики метеорологічних умов утворення відкладень ожеледі

| Види коливань | Вібрація | Галопування | Субколивання |
|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Тип ПЛ | будь-який | будь-який | з розщепленими фазами |
| Діапазон частот, Гц | 3–150 | 0,08–3 | 0,15–10 |
| Амплітуда коливань (по відношенню до діаметру проводу) | 0,01–1 | 5–300 | 0,5–20 |
| Характер вітру | стійкий | стійкий | стійкий, рівний |
| Швидкість вітру, м/с | 1–7 | 7–18 | 4–18 |
| Поверхня проводів | голі, або з рівномірною ожеледдю | Несиметричне відкладення ожеледі | Голі, сухі |

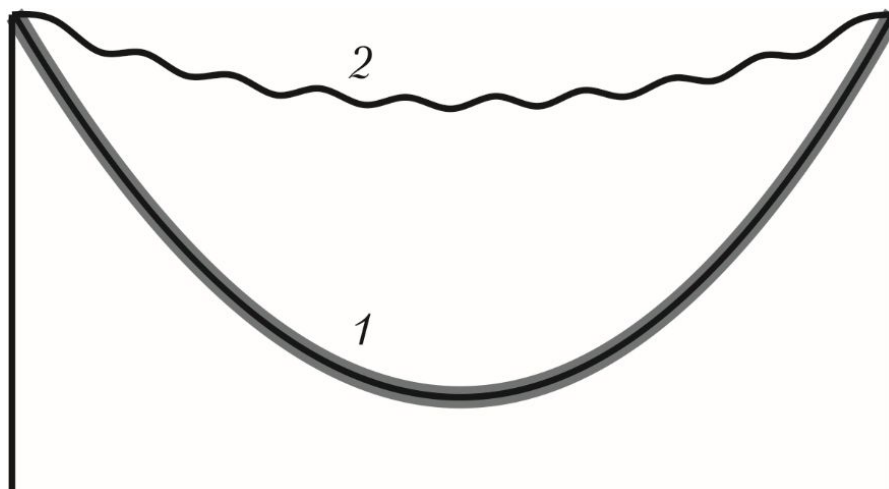
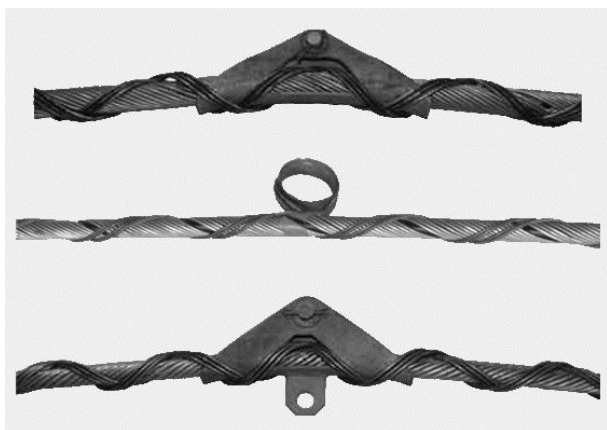
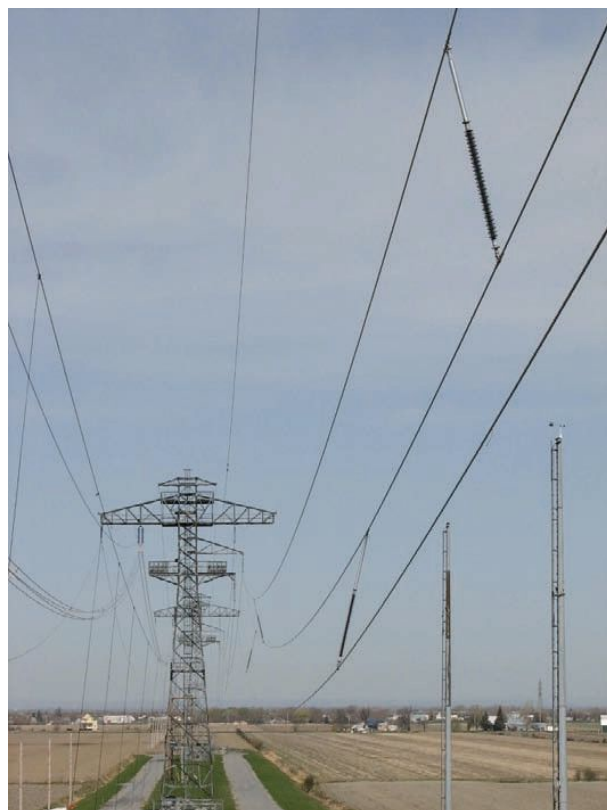


Рис. 1.45. Ілюстрація коливання проводів після скидання ожеледі

Другий вид коливань, не пов'язаний з дією вітру – коронне галопування проводів. Такі коливання виникають за значної напруженості електричного поля навколо проводів ліній надвисокої номінальної напруги. Під час виникнення корони електричні розряди відбуваються здебільшого із зовнішнього боку конструкції розщепленої фази. Тут енергія електричних розрядів може переходити в кінетичну енергію коливань проводів. Такі коливання відбуваються з частотою 0,2-2 Гц та амплітудою 0,3-2,7 м.



а) спіральний протектор



в) застосування міжфазних
демпферних розпірок



б) багаточастотний гасник вібрації



г) дистанційна антивібраційна
розпірка

Рис. 1.46. Заходи обмеження коливань проводів
повітряних ліній електропередавання

Основні заходи боротьби з коливаннями проводів повітряних ліній полягають в наступному [16].

1. Посилення проводів та тросів в місцях закріплення спеціальними армованими прутками – спіральними протекторами, як показано на рис. 1.46 а.
2. Застосування антивібраційних затискачів.
3. Застосування демпферних гасників вібрації, представлених, наприклад, на рис. 1.46 б.
4. Застосування гасників галопування проводів.
5. Використання міжфазних демпферних розпірок (див. рис. 1.46 в).
6. Застосування обмежувачів утворення ожеледі та налипання мокрого снігу.
7. Застосування демпферних всерединіфазних розпірок в пучках розщеплених проводів, як показано на рис. 1.46 г.
8. Використання самодемпфуючих проводів, наприклад, проводів марки Aero-Z.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *Перелічіть види коливань проводів, пов'язані з дією вітру.*
2. *Поясніть фізичний зміст виникнення та дайте коротку характеристику вібрації проводів повітряних ліній електропередавання.*
3. *Поясніть фізичний зміст виникнення та дайте коротку характеристику галопування проводів повітряних ліній електропередавання.*
4. *Поясніть фізичний зміст виникнення та дайте коротку характеристику субколивання проводів повітряних ліній електропередавання.*
5. *Поясніть фізичний зміст виникнення та дайте коротку коливань проводів повітряних ліній, пов'язаних із скиданням ожеледі.*
6. *Поясніть фізичний зміст виникнення та дайте коротку характеристику коронного галопування проводів повітряних ліній.*
7. *Перелічіть основні заходи боротьби з коливанням проводів повітряних ліній.*



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[16], с. 44-58; [34], с. 33-36.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДІВ ТА ТРОСІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

2.1. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Повітряні лінії електропередавання знаходяться під постійним активним впливом навколишнього середовища. Це означає, що зміна кліматичних навантажень та впливів призводить до зміни механічних характеристик конструктивних елементів ліній, зокрема проводів та тросів. Тут, насамперед, слід розглядати пружне розтягування проводів (тросів) через зміну механічних навантажень та теплове здовження проводів (тросів) через зміну температури.

Силу, яка виникає внаслідок дії на провід або трос власної ваги а також зовнішніх навантажень від ваги ожеледі та натиску вітру і направлену на розтягування проводу (тросу), називають *тяжінням*. Тяжіння є рівномірно розподіленим вздовж довжини проводу (тросу) та направлене за дотичною до кривої провисання у кожній точці проводу (тросу) [34]. Відповідно до Міжнародної системи одиниць тяжіння вимірюють у ньютонках.

Зміна умов експлуатації повітряної лінії обумовлює зміну тяжіння проводів (тросів), що призводить до зміни довжини проводу через пружне розтягування відповідно до закону Гука:

$$\Delta L = \frac{T}{EF} L, \quad (2.1)$$

де L – довжина проводу, на який не діє жодної зовнішньої сили; F – площа поперечного перерізу проводу; E – модуль пружності (модуль Юнга).

З виразу (2.1) випливає, що реакція проводу на зміну зусиль, направлених на його розтягування, визначається модулем пружності матеріалу, з якого виготовлено провід та його перерізом. Чим менший модуль пружності та (або) переріз проводу, тим більшого здовження буде зазнавати провід під час пружного розтягування. Відомо, що для алюмінієвих проволочок модуль пружності становить 63 ГПа, а для сталевих – 200 ГПа (див. дані табл. 1.2). Це означає, що проводи, звиті з алюмінієвих проволочок зазнають більшого розтягування, ніж сталеві за однакових зусиль.

В розрахунках механічних навантажень проводів повітряних ліній часто використовують параметр, який визначається відношенням тяжіння в матеріалі проводу до його перерізу. Таку характеристику називають механічним напруженням або просто *напруженням*:

$$\sigma = \frac{T}{F}.$$

Напруження (механічне напруження) — міра інтенсивності внутрішніх сил, розподілених по перерізах проводу (тросу), тобто тяжіння, що припадає на одиницю площі перерізу проводу (тросу). В Міжнародній системі одиниць напруження обчислюють у паскалях.

Закон Гука (2.1) можна записати у вигляді

$$\sigma = E\varepsilon,$$

де σ — напруження проводу; $\varepsilon = \Delta L/L$ — відносне здовження проводу.

Зміна температури проводу відбувається внаслідок зміни температури оточуючого повітря та через нагрівання проводу робочими струмами відповідно до закону Джоуля-Ленца. Внаслідок зміни температури відбувається теплове здовження проводу відповідно до виразу

$$\Delta L = \alpha(t - t_0)L_0, \quad (2.2)$$

де L_0 — довжина проводу за температури t_0 ; α — коефіцієнт лінійного теплового розширення (температурний коефіцієнт теплового здовження) проводу.

З виразу (2.2) випливає, що реакція проводу на зміну температури визначається виключно температурним коефіцієнтом теплового здовження та не залежить від перерізу проводу. Чим більше значення має такий коефіцієнт, тим більшого здовження буде зазнавати провід у разі збільшення його температури. Відомо, що для алюмінієвих проволочок температурний коефіцієнт теплового здовження становить $23 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, а для сталевих — $12 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ (див. дані табл. 1.2). Це означає, що проводи, звиті з алюмінієвих проволочок зазнають майже в два рази більшого здовження, ніж сталеві за однакового збільшення температури.

Рівняння (2.2) інколи записують у вигляді

$$\varepsilon = \alpha \Delta t,$$

де $\Delta t = t - t_0$ — зміна температури проводу.

Таким чином, основні фізико-механічні властивості проводів повітряних ліній електропередавання визначаються модулем пружності та коефіцієнтом теплового здовження.

Для комбінованих сталюалюмінієвих проводів крім розглянутих положень слід додатково враховувати механічні напруження, які виникають в матеріалі проводу через різницю фізико-механічних характеристик проволочок сталюого осереддя та зовнішнього алюмінієвого шару. Справа в тому, що через жорстку скрутку проволочок проводу та відсутність взаємного ковзання проволочок сталюої та алюмінієвої частин проводу тяжіння розподіляється між окремими проволоками не пропорційно площам поперечного

перерізу сталевій та алюмінієвій частин, а з урахуванням їх механічної міцності. Так само, через різницю коефіцієнтів теплового здовження алюмінієвих та сталевих проволоч під час збільшення температури в алюмінієвій частині проводу виникає додаткове механічне напруження, направлене на його скорочення, а в сталевій частині – на його здовження. В задачах аналізу механічних властивостей сталеоалюмінієвих проводів повітряних ліній визначають фіктивні фізико-механічні характеристики (модуль пружності та коефіцієнт теплового здовження), які визначають характеристики проводу у цілому.

Розглянемо визначення фіктивних механічних характеристик сталеоалюмінієвого проводу. Позначимо перерізи сталевого осереддя та алюмінієвого зовнішнього шару через F_c та F_a ; модулі пружності – через E_c та E_a ; температурні коефіцієнти лінійного здовження – через α_c та α_a відповідно. Введемо коефіцієнти

$$k = \frac{F_a}{F_c}; \quad m = \frac{E_a}{E_c}; \quad n = \frac{\alpha_a}{\alpha_c}.$$

Для типових конструкцій сталеоалюмінієвих проводів такі коефіцієнти становлять

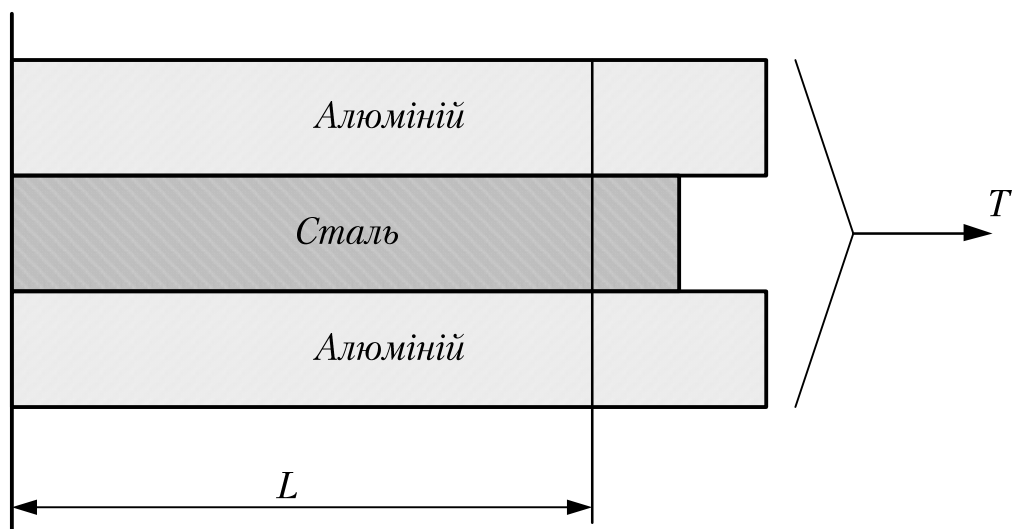
$$k = 4,29 \dots 8,03 \text{ (див. підрозділ 1.2);}$$

$$m = \frac{E_a}{E_c} = \frac{63}{200} = 0,315;$$

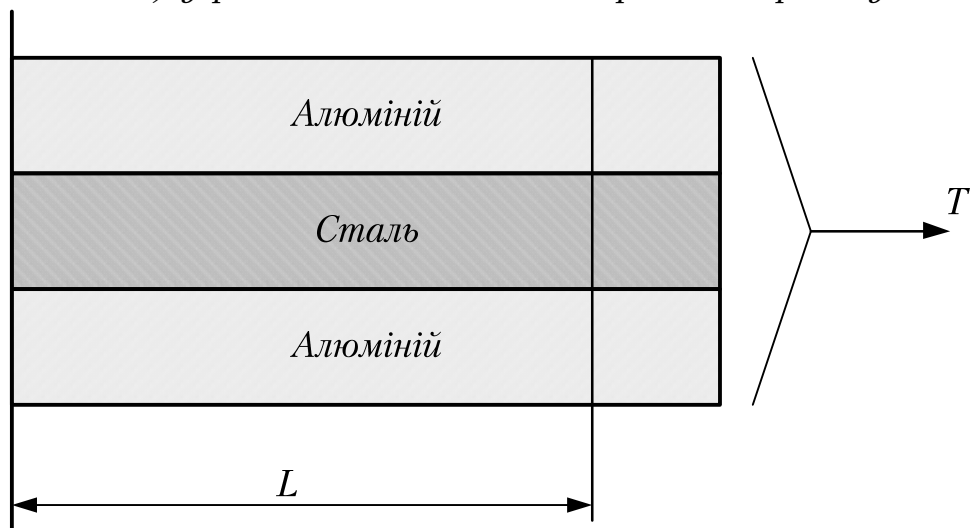
$$n = \frac{\alpha_a}{\alpha_c} = \frac{23 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 10^{-6}} = 1,917.$$

Нехай провід буде жорстко закріплений з одного боку, як показано на рис. 2.1. До іншого кінця проводу прикладене зусилля, направлене на розтягування проводу.

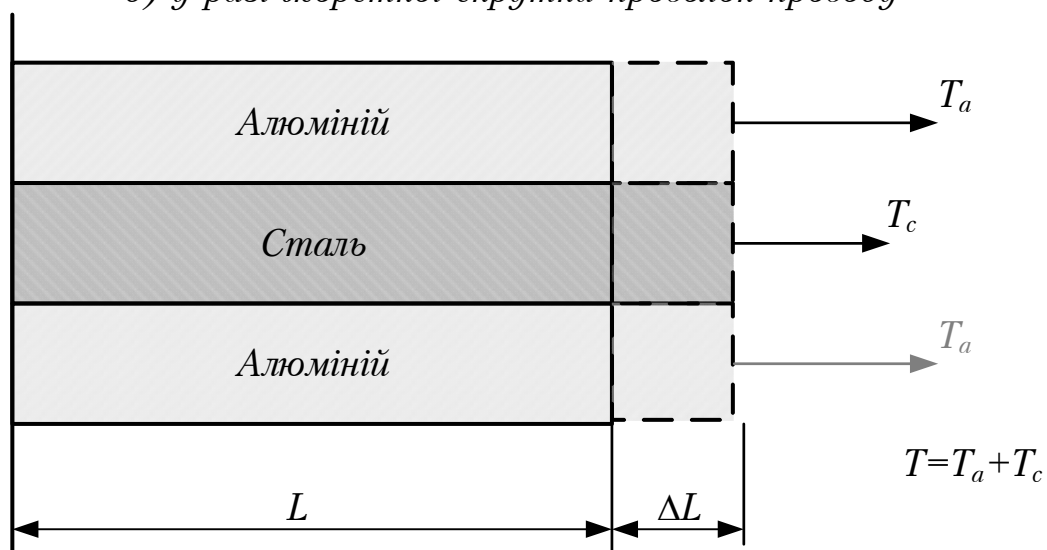
Якщо б проволочки сталевого осереддя та алюмінієвої частини вільно ковзали відносно одне одного, зовнішнє зусилля розподілялось би між проволочками пропорційно їх кількості та перерізам. У цьому разі через меншу механічну міцність здовження алюмінієвих проволоч було б більше, ніж сталевих (див. рис. 2.1 *а*). Проте, через жорстку скрутку проволоч таке ковзання відсутнє. Це викликає додаткове механічне напруження, направлене на скорочення алюмінієвих проволоч та здовження сталевих, через що деформація алюмінієвих та сталевих проволоч проводу однакова (див. рис. 2.1 *б*). Таке явище можна інтерпретувати певним розподілом тяжіння між сталевим осереддям та алюмінієвим шаром проводу таким чином, щоб здовження сталевих і алюмінієвих проволоч було однаковим, а сам провід характеризувався фіктивним модулем пружності (див. рис. 2.1 *в*). Таке положення можна представити рівняннями статички



а) у разі вільного ковзання проволонк проводу



б) у разі жорсткої скрутки проволонк проводу



в) розподіл тяжіння між алюмінієвими та сталевим проволонками

Рис. 2.1. Деформація сталеалюмінієвого проводу під час розтягування

$$\begin{cases} T = T_c + T_a; \\ \Delta L = \Delta L_c = \Delta L_a, \end{cases} \quad (2.3)$$

де T , T_c , T_a – тяжіння в проводі в цілому, в сталевому осередді та алюмінієвому шарі відповідно; ΔL , ΔL_c , ΔL_a – здовження всього проводу, сталевосереддя та алюмінієвої частини відповідно.

Для здовження складових проводу запишемо вирази закону Гука

$$\Delta L = \frac{T}{EF} L; \quad \Delta L_c = \frac{T_c}{E_c F_c} L; \quad \Delta L_a = \frac{T_a}{E_a F_a} L, \quad (2.4)$$

де E – фіктивний модуль пружності сталесалюмінієвого проводу.

Виразимо з рівнянь (2.4) тяжіння складових проводу

$$\begin{cases} T = EF \frac{\Delta L}{L} = EF \varepsilon; \\ T_c = E_c F_c \frac{\Delta L}{L} = E_c F_c \varepsilon; \\ T_a = E_a F_a \frac{\Delta L}{L} = E_a F_a \varepsilon \end{cases}$$

і підставимо до першого рівняння системи (2.3):

$$EF \varepsilon = E_c F_c \varepsilon + E_a F_a \varepsilon.$$

Звідки

$$E = \frac{E_c F_c + E_a F_a}{F_c + F_a} = \frac{E_c F_c (1 + km)}{F_c (1 + k)} = E_c \frac{1 + km}{1 + k} = E_a \frac{1 + km}{(1 + k)m}. \quad (2.5)$$

Очевидно, що фіктивний модуль пружності сталесалюмінієвого проводу більший за модуль пружності алюмінієвих проволочок, але менший, ніж сталевих проволочок. Дійсно, для типових конструкцій сталесалюмінієвих проводів справедливе співвідношення

$$\frac{1 + km}{1 + k} < 1 < \frac{1 + km}{(1 + k)m},$$

звідки, з урахуванням (2.5)

$$E_a < E < E_c.$$

Розподіл тяжіння між сталесою та алюмінієсою частинами проводу можна визначити за виразами:

$$\begin{aligned}
 T_c &= E_c F_c \varepsilon = E_c F_c \frac{T}{EF} = T \frac{E_c F_c}{E_c \left(\frac{1+km}{1+k} \right) F_c (1+k)} = T \frac{1}{1+km}; \\
 T_a &= E_a F_a \varepsilon = E_a F_a \frac{T}{EF} = T \frac{E_c m F_c k}{E_c \left(\frac{1+km}{1+k} \right) F_c (1+k)} = T \frac{km}{1+km}.
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що тяжіння в матеріалі сталевалюмінієвого проводу розподіляється не пропорційно перерізам складових, а з урахуванням співвідношення модулів пружності сталевих та алюмінієвих проволок.

Розглянемо випадок, коли зовнішнє зусилля, направлене на розтягування проводу, розподіляється навпіл між сталевими та алюмінієвими проволочками. Такому положенню відповідає рівність

$$T \frac{1}{1+km} = T \frac{km}{1+km},$$

з якої випливає, що тяжіння в алюмінії та сталі буде однаковим за умови співвідношення між перерізами складових проводу

$$k = \frac{1}{m} = 3,175.$$

Оскільки для типових конструкцій сталевалюмінієвих проводів співвідношення між перерізами складових завжди більше за 3,175, тяжіння алюмінієвих проволок завжди більше, ніж сталевих, але менше частки сумарного тяжіння, обумовленої співвідношенням між перерізами складових проводу. Дійсно, за будь-якої конструкції сталевалюмінієвого проводу справедливе співвідношення

$$\frac{T_a}{T_c} = km < k.$$

Так для сталевалюмінієвих проводів, призначених для експлуатації в умовах середніх механічних навантажень, сталеве осереддя сприймає біля 35% механічного навантаження за перерізу сталевих осереддя до 15% сумарного.

Рівність відносних здовжень складових сталевалюмінієвого проводу можна подати у вигляді

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_a}{E_a},$$

звідки

$$\sigma_a = \frac{E_a}{E_c} \sigma_c = m \sigma_c \quad (2.7)$$

Аналіз виразу (2.7) свідчить про те, що напруження алюмінієвих проволоч завжди менше, чим сталевих, співвідношення між напруженнями алюмінієвих та сталевих проволоч не залежить від їх перерізів, та завжди дорівнює співвідношенню між модулями пружності алюмінію та сталі.

Напруження сталевих та алюмінієвих проволоч становлять

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \sigma \frac{E}{E_c} = \sigma \frac{1+k}{1+km}; \\ \sigma_a &= \sigma \frac{E}{E_a} = \sigma \frac{(1+k)m}{1+km}, \end{aligned}$$

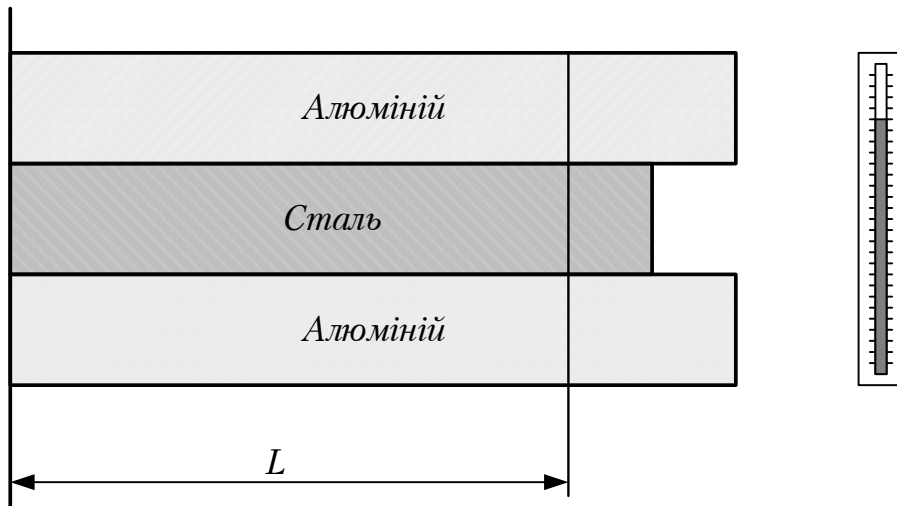
де σ – фіктивне напруження сталеалюмінієвого проводу в цілому.

Для визначення фіктивного коефіцієнту лінійного теплового здовження розглянемо реакцію сталеалюмінієвого проводу, жорстко закріпленого з одного боку на підвищення температури (див. рис. 2.2). Якщо б проволочки шарів проводу вільно ковзали один відносно одного, то здовження алюмінієвих проволоч було б більше, ніж сталевих через більше значення коефіцієнту теплового здовження, як показано на рис. 2.2 а. Проте, через жорстку скрутку проволоч в шарах сталеалюмінієвого проводу спостерігається теплове напруження і виникає додаткове тяжіння, направлене на скорочення довжини алюмінієвих проволоч та здовження проволоч сталевого осереддя (див. рис. 2.2 б) [16]. Очевидно, що такі додаткові тяжіння зрівноважують один одного, тобто є однаковими за модулем та протилежними за напрямом. В результаті здовження сталевий та алюмінієвий частин проводу однакові, що відповідає фіктивному тепловому здовженню проводу в цілому. Зазначені положення можна представити рівняннями статички

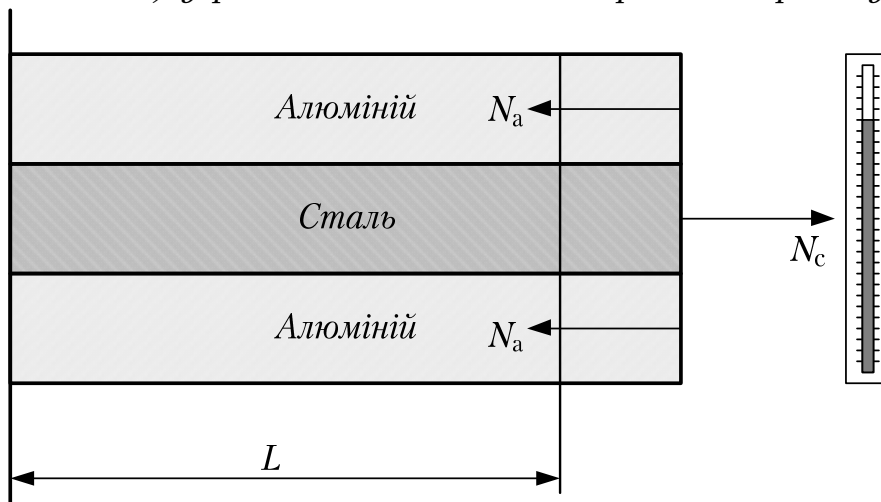
$$\begin{cases} N_c + N_a = 0; \\ \Delta L = \Delta L_c = \Delta L_a. \end{cases} \quad (2.8)$$

Здовження окремих шарів сталеалюмінієвого проводу можна представити як результат накладання пружного здовження (скорочення) проводу на теплове здовження проводу (див. рис. 2.2 в)

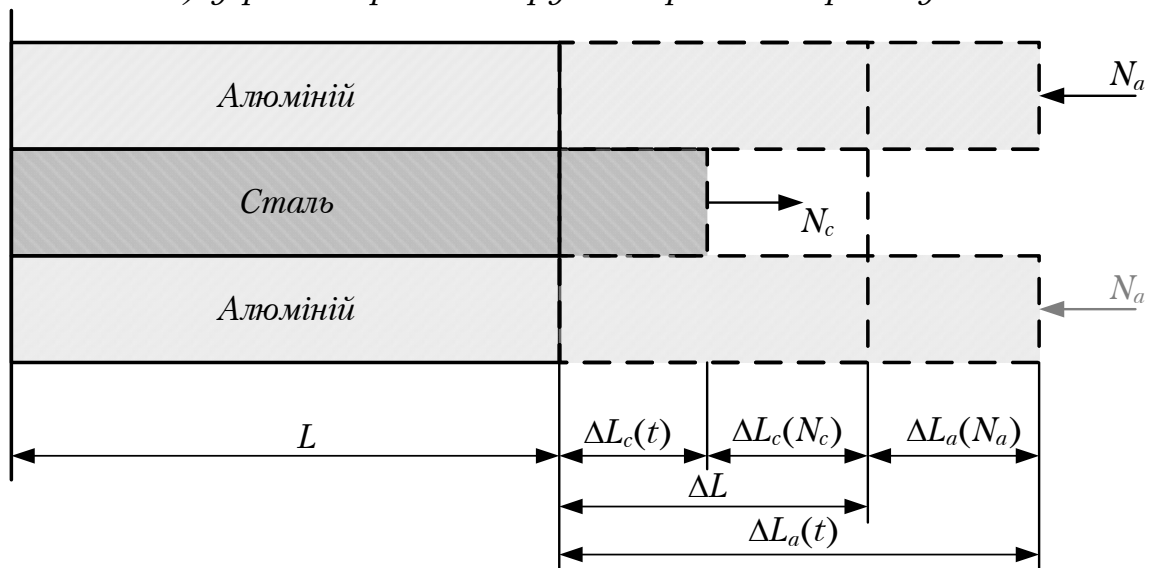
$$\begin{cases} \Delta L_c = \Delta L_c(t) + \Delta L_c(N_c); \\ \Delta L_a = \Delta L_a(t) + \Delta L_a(N_a), \end{cases} \quad (2.9)$$



а) у разі вільного ковзання проволок проводу



б) у разі жорсткої скрутки проволок проводу



в) схема деформації сталевалюмінієвого проводу

Рис. 2.2. Деформація сталевалюмінієвого проводу у разі підвищення температури

де $\Delta L_c(t)$, $\Delta L_a(t)$ – теплове здовження сталевोї та алюмінієвої частин проводу відповідно; $\Delta L_c(N_c)$, $\Delta L_a(N_a)$ – здовження (скорочення) проводу через теплове напруження в матеріалі проводу.

Оскільки загальні здовження алюмінієвої та сталевोї частин проводу однакові (дивись друге рівняння системи (2.8)), то ліві частини рівнянь (2.9) можна представити як результат фіктивного теплового здовження сталеоалюмінієвого проводу в цілому.

Тоді з урахуванням закону теплового здовження та закону Гука систему рівнянь (2.9) можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \alpha \Delta t L = \alpha_c \Delta t L + \frac{N_c L}{E_c F_c}; \\ \alpha \Delta t L = \alpha_a \Delta t L + \frac{N_a L}{E_a F_a}, \end{cases} \quad (2.10)$$

де α – фіктивний температурний коефіцієнт лінійного здовження сталеоалюмінієвого проводу в цілому.

Після скорочення рівнянь системи (2.10) на довжину проводу L , множення першого рівняння на добуток $E_c F_c$, а другого – на $E_a F_a$ і перегрупування складових система рівнянь (2.10) набуває вигляду

$$\begin{cases} (\alpha - \alpha_c) \Delta t E_c F_c = N_c; \\ (\alpha - \alpha_a) \Delta t E_a F_a = N_a. \end{cases} \quad (2.11)$$

Якщо скласти рівняння системи (2.11), то отримуємо

$$\alpha (E_c F_c + E_a F_a) = \alpha_c E_c F_c + \alpha_a E_a F_a.$$

Звідки

$$\alpha = \frac{\alpha_c E_c F_c + \alpha_a E_a F_a}{E_c F_c + E_a F_a},$$

або

$$\alpha = \frac{\alpha_c E_c F_c (1 + kmn)}{E_c F_c (1 + km)} = \alpha_c \frac{1 + kmn}{1 + km} = \alpha_a \frac{1 + kmn}{(1 + km)n}. \quad (2.12)$$

Очевидно, що фіктивний температурний коефіцієнт лінійного здовження сталеоалюмінієвого проводу більший, ніж сталевих проволок, але менший, ніж алюмінієвих.

$$\alpha_c < \alpha < \alpha_a.$$

Аналіз виразу (2.12) свідчить про те, що теплове здовження сталевих та алюмінієвих проводів визначається не лише відношенням температурних коефіцієнтів лінійного здовження та перерізів сталевих та алюмінієвих частин проводу, а, додатково, й модулів пружності сталевих та алюмінієвих проволоч. Це пояснюється виникаючим тепловим напруженням в матеріалі проводу.

Рівність

$$\alpha - \alpha_c = \alpha_a - \alpha \quad (2.13)$$

дозволяє визначити співвідношення між перерізами складових сталевих та алюмінієвих проводів, за якого фіктивне значення температурного коефіцієнту лінійного здовження дорівнює середньому арифметичному значенню відповідних коефіцієнтів сталевих та алюмінієвих проволоч. З урахуванням (2.12) рівність (2.13) набуває вигляду

$$\alpha \left(1 - \frac{1 + km}{1 + kmn} \right) = \alpha \left(\frac{(1 - km)n}{1 + kmn} - 1 \right),$$

звідки

$$k = \frac{1}{m} = 3,175.$$

Оскільки для типових конструкцій сталевих та алюмінієвих проводів співвідношення між перерізами складових завжди більше за 3,175, фіктивний температурний коефіцієнт теплового здовження завжди більший середнього арифметичного значення коефіцієнтів сталевих та алюмінієвих проволоч.

Визначимо теплові напруження, які виникають в проволочках сталевих та алюмінієвих проводів у разі зміни його температури. Відповідно до виразів (2.11) та (2.12) маємо

$$\begin{cases} \sigma_c^{(t)} = \frac{N_c}{F_c} = (\alpha - \alpha_c) \Delta t E_c = \alpha_c \frac{km(n-1)}{1+km} \Delta t E_c; \\ \sigma_a^{(t)} = \frac{N_a}{F_a} = (\alpha_a - \alpha) \Delta t E_a = \alpha_a \frac{n-1}{(1+km)n} \Delta t E_a. \end{cases}$$

Співвідношення між тепловими напруженнями сталевих та алюмінієвих проволоч становить

$$\frac{\sigma_c^{(t)}}{\sigma_a^{(t)}} = \frac{\alpha_c \frac{km(n-1)}{1+km} \Delta t E_c}{\alpha_a \frac{n-1}{(1+km)n} \Delta t E_a} = \frac{\frac{km(n-1)}{1+km}}{n \frac{n-1}{(1+km)n}} = k.$$

Аналіз отриманого результату свідчить про те, що співвідношення між тепловими напруженнями сталевих та алюмінієвих проволоч сталеалюмінієвого проводу не залежить від фізико-механічних характеристик матеріалів, з яких виконані проволочки проводу та визначається лише співвідношенням між перерізами складових проводу.

Розглянемо реакцію сталеалюмінієвого проводу на одночасну зміну зовнішніх зусиль, направлених на розтягування проводу та його температури. У цьому разі тяжіння проволоч проводу, зумовлені цими факторами, алгебрично підсумовують відповідно до виразів

$$\begin{cases} T_c = T \frac{1}{1 + km} + N_c; \\ T_a = T \frac{km}{1 + km} + N_a. \end{cases}$$

Оскільки сума додаткових тяжінь, обумовлених тепловим напруженням проволоч проводу, дорівнює нулю, сума тяжінь сталевих та алюмінієвих проволоч дорівнює зовнішньому зусиллю

$$T_c + T_a = T \frac{1}{1 + km} + N_c + T \frac{km}{1 + km} + N_a = T.$$

Напруження сталевих та алюмінієвих проволоч також визначається алгебричною сумою відповідних напружень

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma \frac{E_c}{E} + (\alpha - \alpha_c) \Delta t E_c; \\ \sigma_a = \sigma \frac{E_a}{E} + (\alpha - \alpha_a) \Delta t E_a. \end{cases} \quad (2.14)$$

Слід зважати на те, що зміна температури проводу, закріпленого на опорах обумовлює також зміну його напруження, тобто зміну обох складових правих частин виразів (2.14). Оскільки значення фіктивного температурного коефіцієнту лінійного здовження сталеалюмінієвого проводу лежить в діапазоні між значеннями відповідних коефіцієнтів сталевих та алюмінієвих проволоч, додаткове напруження, обумовлене зміною температури визначає збільшення напруження сталі та одночасне зменшення напруги алюмінію у разі збільшення температури та навпаки, зменшення напруження сталі та збільшення напруження алюмінію у разі зниження температури. Слід зазначити, що теплове напруження проволоч сталеалюмінієвого проводу має істотне значення саме у разі зниження температури проводу, оскільки через скорочення довжини проводу, закріпленого на опорах, збільшується тяжіння проводу. На таке явище накладається додаткове зусилля, обумовлене тепловим напруженням проволоч, що обумовлює збільшення напруження алюмінієвих проволоч, які характеризуються

меншою механічною міцністю. Таке явище, очевидно, зменшують механічну міцність сталевалюмінієвого проводу в цілому порівняно із сумарною механічною міцністю сталевих та алюмінієвих проволок, з яких звитий провід.

Рівняння (2.14) дозволяють визначити допустимі напруження сталевалюмінієвих проводів

$$\begin{cases} \sigma_{\text{доп}} = \sigma_{\text{с}}^{\text{доп}} \frac{1 + km}{1 + k} - (\alpha - \alpha_{\text{с}})(t - t_0) E; \\ \sigma_{\text{доп}} = \sigma_{\text{а}}^{\text{доп}} \frac{1 + km}{(1 + k)m} - (\alpha - \alpha_{\text{а}})(t - t_0) E, \end{cases} \quad (2.15)$$

де $\sigma_{\text{с}}^{\text{доп}}$, $\sigma_{\text{а}}^{\text{доп}}$ – допустимі напруження сталевих та алюмінієвих проволок відповідно; E – фіктивний модуль пружності сталевалюмінієвого проводу; t_0 – температура, за якої був звитий провід.

Допустиме напруження сталевалюмінієвого проводу приймають меншим серед визначених за виразами (2.15).

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Зазначте фізичні явища, які визначають механічні характеристики проводів повітряних ліній електропередавання.
2. Дайте визначення тяжіння та механічного напруження в матеріалі проводу.
3. Сформулюйте закон Гука щодо проводів повітряних ліній.
4. Сформулюйте закон теплового розширення речовин щодо проводів повітряних ліній.
5. Поясніть фізичний зміст фіктивних фізико-механічних характеристик сталевалюмінієвих проводів.
6. Поясніть особливості розподілу тяжіння між сталевими та алюмінієвими проволочками сталевалюмінієвих проводів.
7. Поясніть зв'язок фіктивного коефіцієнту теплового здовження сталевалюмінієвих проводів з модулями пружності сталевих та алюмінієвих проволок.
8. Поясніть зменшення механічної міцності сталевалюмінієвого проводу по відношенню до сумарної механічної міцності сталевих та алюмінієвих проволок, з яких звитий провід.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 38-48; [16], с. 75-79; [63], с. 524-527.

2.2. КРИВА ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

Довжина проводу у прогоні на декілька порядків перевищує діаметр проводу, що дозволяє умовно розглядати провід як гнучку нитку, закріплену у двох точках, яка зазнає рівномірно розподіленого навантаження від власної ваги, ваги відкладень ожеледі та натиску вітру.

Гнучкою ниткою називають гнучкий елемент, який характеризується зневажливо малою жорсткістю на вигін та працює тільки на розтягування. Гнучки нитки служать розрахунковою моделлю несучих тросів, ланцюгів підвісних мостів, проводів та тросів повітряних ліній тощо [5, 20, 40, 46]. Гнучки нитки є геометрично змінними системами, форма яких визначається видами та місцями прикладання навантажень.

Для визначення геометричної форми кривої провисання будемо розглядати провід, який зазнає рівномірно розподіленого навантаження, обумовленого власною вагою та, можливо, зовнішніми кліматичними навантаженнями.

В механічних розрахунках повітряних ліній визначають одиничні та питомі навантаження, які зазнають проводи та троси лінії.

Одиничним навантаженням називають рівномірно розподілене навантаження, яке приходить на одиницю довжини проводу (тросу). Одиничні навантаження, зазвичай, позначають латинською літерою p та вимірюють у ньютонах на метр (Н/м).

Питомим навантаженням називають відношення одиничного навантаження до поперечного перерізу проводу або тросу. Питомі навантаження, зазвичай, позначають грецькою літерою γ та вимірюють у паскалях на метр (Па/м).

Одиничні та питомі навантаження пов'язані співвідношенням

$$\gamma = \frac{p}{F},$$

де F – площа розрахункового перерізу проводу, мм².

Розглянемо елементарну ділянку проводу повітряної лінії за умови відсутності дії бокових горизонтальних сил від натиску вітру. У цьому разі крива провисання проводу буде знаходитись у вертикальній площині, як показано на рис. 2.3, де використано наступні позначення: dl – довжина елементарної ділянки; dx , dy – горизонтальна та вертикальна проекції елементарної ділянки відповідно; p – одиничне навантаження, яке зазнає провід; pdl – вертикальне навантаження, яке зазнає елементарна ділянка; dT – елементарне прирощення тяжіння проводу на ділянці; α – кут між вектором прирощення тяжіння та горизонталлю.

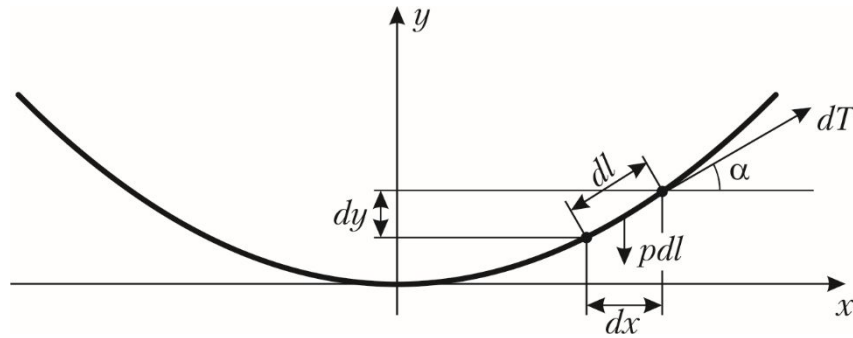


Рис. 2.3. Сили, які діють на елементарну ділянку проводу

Запишемо рівняння статки для зрівноваженої нерухомої елементарної ділянки

$$\begin{aligned}\sum X &= 0; \\ \sum Y &= 0,\end{aligned}$$

де X , Y – горизонтальні та вертикальні проекції сил, які діють на елементарну ділянку.

Горизонтальна складова тяжіння у будь-якій точці проводу становить

$$T_x = T \cos \alpha.$$

Своєю чергою, горизонтальна складова елементарного прирощення тяжіння дорівнює $dT \cos \alpha$. Таким чином, рівняння рівноваги горизонтальних проекцій сил, які діють на елементарну ділянку набувають вигляду

$$\sum X = dT \cos \alpha = 0. \quad (2.16)$$

Інтегрування диференційного рівняння (2.16) дає наступний результат

$$T \cos \alpha = \text{const} = H, \quad (2.17)$$

де H – тяжіння в нижній точці провисання проводу.

Із аналізу виразу (2.17) випливає, що горизонтальна проекція тяжіння в будь-якій точці проводу є сталою величиною та дорівнює тяжінню в нижній точці його провисання [31].

Вертикальна складова тяжіння в будь-якій точці проводу становить

$$T_y = T \sin \alpha = H \operatorname{tg} \alpha.$$

Для елементарної ділянки проводу рівняння рівноваги вертикальних проекцій сил набуває вигляду

$$\sum Y = -pds + dH \operatorname{tg} \alpha = 0. \quad (2.18)$$

Проведемо перетворення виразу (2.18) з урахуванням співвідношень

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = y'; \quad ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + y'^2},$$

де y' – похідна в точці з абсцисою x .

В результаті рівняння (2.18) набуває вигляду

$$p dx \sqrt{1 + y'^2} = H dy',$$

або

$$\frac{dy'}{\sqrt{1 + y'^2}} = \frac{p}{H} dx. \quad (2.19)$$

Після інтегрування рівняння (2.19) отримуємо

$$\operatorname{Arsh} y' = \frac{p}{H} x + C_1, \quad (2.20)$$

де C_1 – стала інтегрування, значення якої знаходимо для умов нижньої точки провисання проводу. Оскільки для цієї точки $x = 0$; $y = 0$; $y' = 0$, отже $C_1 = 0$.

Таким чином, вираз (2.20) можна подати у вигляді

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \left(\frac{p}{H} x \right). \quad (2.21)$$

Подальше інтегрування рівняння (2.21) визначає вираз

$$y = \frac{H}{p} \operatorname{ch} \frac{px}{H} + C_2. \quad (2.22)$$

де C_2 – стала інтегрування, значення якої знаходимо для умов нижньої точки провисання проводу. Оскільки для цієї точки $x = 0$; $y = 0$, отже $C_2 = -H/p$.

Таким чином, отримуємо

$$y = \frac{H}{p} \left(\operatorname{ch} \frac{px}{H} - 1 \right), \quad (2.23)$$

або

$$y = \frac{\sigma_o}{\gamma} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma_o} x \right) - 1 \right), \quad (2.24)$$

де γ – питоме навантаження на провід; σ_o – напруження проводу (тросу) в нижній точці його провисання.

Отриманий вираз (2.23) визначає форму кривої провисання проводу у прогоні. Такий вираз називають рівнянням ланцюгової лінії, а геометри-

чну форму, яку приймає провід у просторі – ланцюговою лінією або кате-
нарією. Зазначимо, що гіперболічний косинус є парною функцією, значення якої не залежать від знаку аргументу, що визначає вертикальну симетрію кривої провисання проводу відносно нижньої точки.

Вимоги інженерної точності до моделювання проводів у прогонах повітряних ліній електропередавання дозволяють скористатися розкладанням гіперболічної функції у виразі (2.24) у ступеневий ряд, обмежений першими складовими. В результаті вираз (2.24) набуває вигляду

$$y \approx \frac{\sigma_o}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\sigma_o} x \right)^2 - 1 \right) = \frac{\gamma}{2\sigma_o} x^2 = \frac{p}{2H} x^2. \quad (2.25)$$

Можна показати, що рівняння параболи (2.25) для моделювання кривої провисання проводу у прогоні отримують за умови допущення про рівномірний розподіл навантаження не вздовж довжини проводу, а вздовж довжини прогону. Відомо, довжина проводу в прогоні перевищує довжину прогону не більш, ніж на 2-2,5% (див. підрозділ 2.4). Тому прийняте допущення є виправданим.

Розглянемо відрізок проводу у прогоні між нижньою точкою провисання та довільною точкою у прогоні, представлений на рис. 2.4. Відповідно до методу перерізів [5, 9, 20, 40, 43, 46] дію відкинутих частин проводу представлено зосередженими силами тяжіння, направленими вздовж дотичних у точках розрізу проводу. Тяжіння у нижній та довільній точках позначено через H та T_A відповідно. Дію навантаження від власної ваги проводу представлено зосередженою силою px , прикладеною в середині відрізка відповідно до прийнятого допущення про рівномірний розподіл ваги проводу вздовж прогону. На рис. 2.4 x, y – довжини проєкцій відрізка проводу на горизонтальну та вертикальну вісі відповідно.

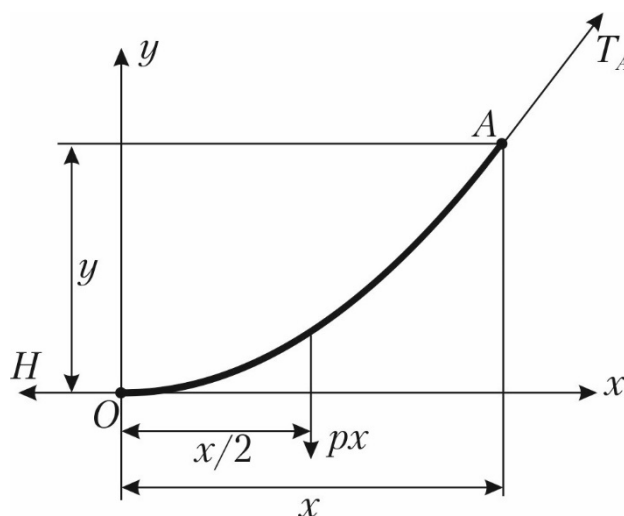


Рис. 2.4. Схема відрізка проводу у прогоні

Запишемо рівняння рівноваги моментів сил відносно точки A відрізка проводу

$$px \frac{x}{2} - Hy = 0. \quad (2.26)$$

У виразі (2.26) із додатнім знаком враховано моменти сил, направлені проти годинникової стрілки.

З рівняння (2.26) отримуємо

$$y = \frac{px^2}{2H} = \frac{\gamma x^2}{2\sigma_0}, \quad (2.27)$$

де γ – питоме навантаження, яке зазнає провід; σ_0 – напруження проводу в нижній точці провисання.

Вираз (2.27) являє собою рівняння кривої провисання проводу у прогоні. Ця крива являє собою параболу із вершиною у нижній точці провисання проводу.

Зауважимо, що рівняння (2.27) отримане виходячи з допущення про рівномірний розподіл механічного навантаження вздовж довжини прогону, а не вздовж довжини проводу. На рис. 2.5 представлено графічну залежність похибки застосування рівняння параболу від довжини прогону для сталевалюмінієвого проводу марки АС-400/64. З рис. 2.5 видно, що похибка моделювання є від'ємною, тобто вираз (2.27) дає занижені значення ординат кривої провисання проводу. Для типових конструкцій повітряних ліній така похибка є зневажливо малою і стає істотною тільки для великих прогонів, наприклад, великих переходів через водні простори. Це обумовлює допустимість моделювання кривої провисання проводу за допомогою параболу для прогонів, довжиною до 800 м.

Криву провисання проводу у прогоні довжиною до 800 м можна побудувати на підставі аналітичного розрахунку точок параболу за виразом (2.27). Проте, інколи, зручно проводити побудову параболу, відому з аналітичної геометрії [34]. Для цього в системі координат, прив'язаної до нижньої точки провисання проводу в обраних масштабах необхідно відкласти по горизонталі половину довжини прогону, а по вертикалі – стрілу провисання, як показано на рис. 2.6. Поділимо горизонтальний та вертикальний відрізки на однакову кількість частин, наприклад, на 10. Поєднаємо кожну з точок вертикального відрізка прямою з точкою O . Перетини вертикальних прямих, проведених з точок горизонтального відрізка з нахиленими прямими визначають відповідні точки параболу. Ліву частину параболу будують в аналогічний спосіб.

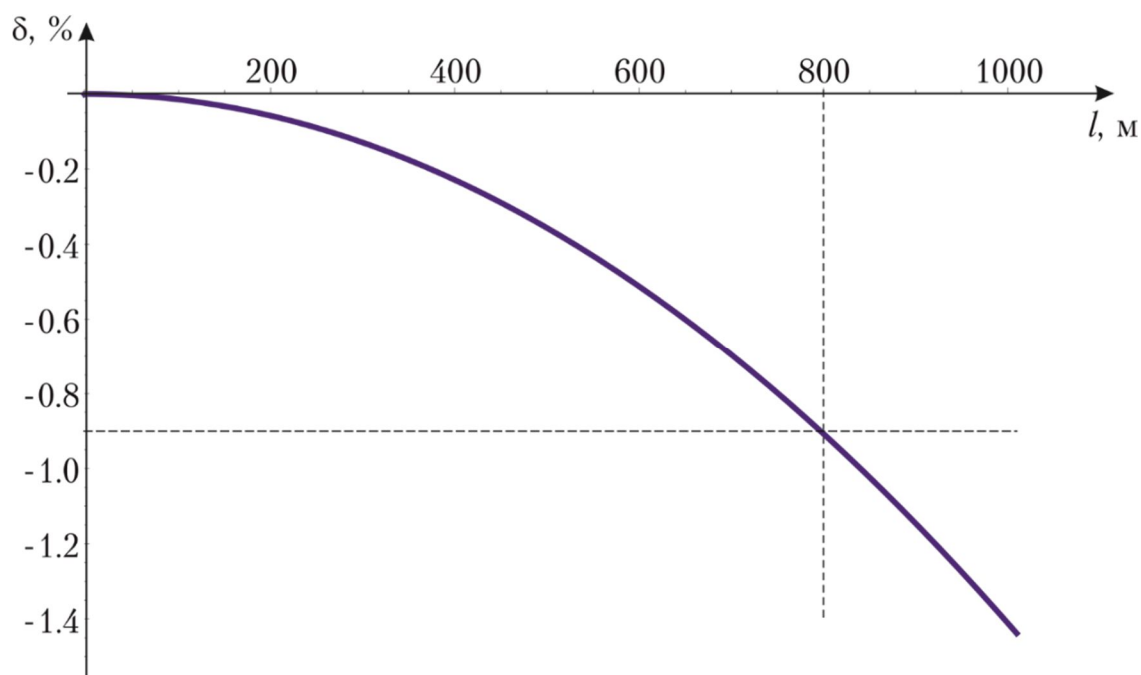


Рис. 2.5. Залежність похибки моделювання кривої провисання проводу за допомогою параболи від довжини прогону

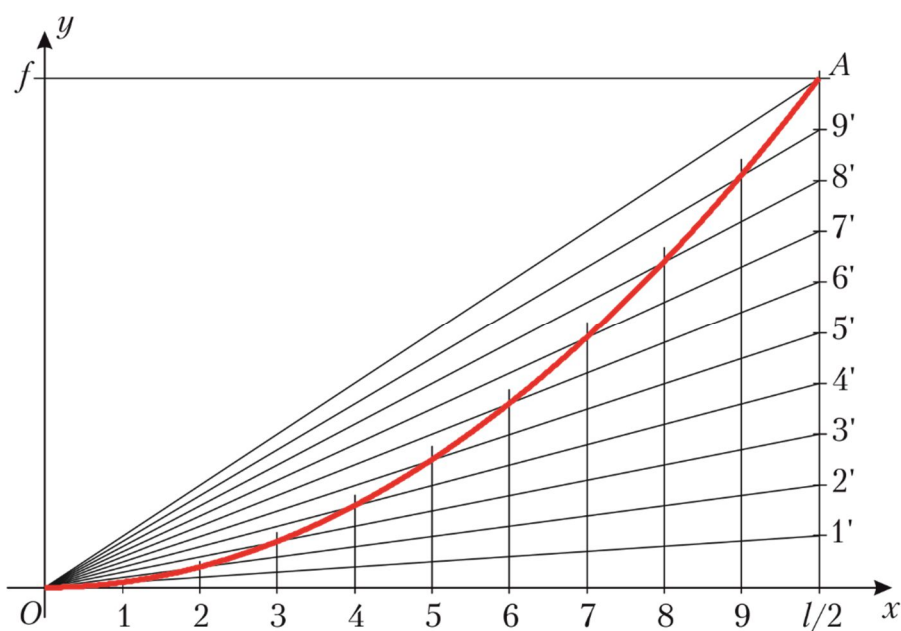


Рис. 2.6. Побудова параболи

Для прогонів великих переходів довжиною більше 800-1000 м використання рівняння параболи (2.27) неприпустимо через істотні похибки. У цьому разі для моделювання кривої провисання проводу у прогоні слід використовувати рівняння ланцюгової лінії (2.24) або вираз

$$y = \frac{px^2}{2H} + \frac{p^3x^4}{24H^3} = \frac{\gamma x^2}{2\sigma_0} + \frac{\gamma^3 x^4}{24\sigma_0^3}. \quad (2.28)$$

Вираз (2.28) отримано розкладанням рівняння ланцюгової лінії (2.24) в ступеневий ряд, обмежений трьома складовими. У цьому разі похибка моделювання стає зневажливо малою, що проілюстровано, наприклад, для проводу марки АС-400/64 на рис. 2.7.

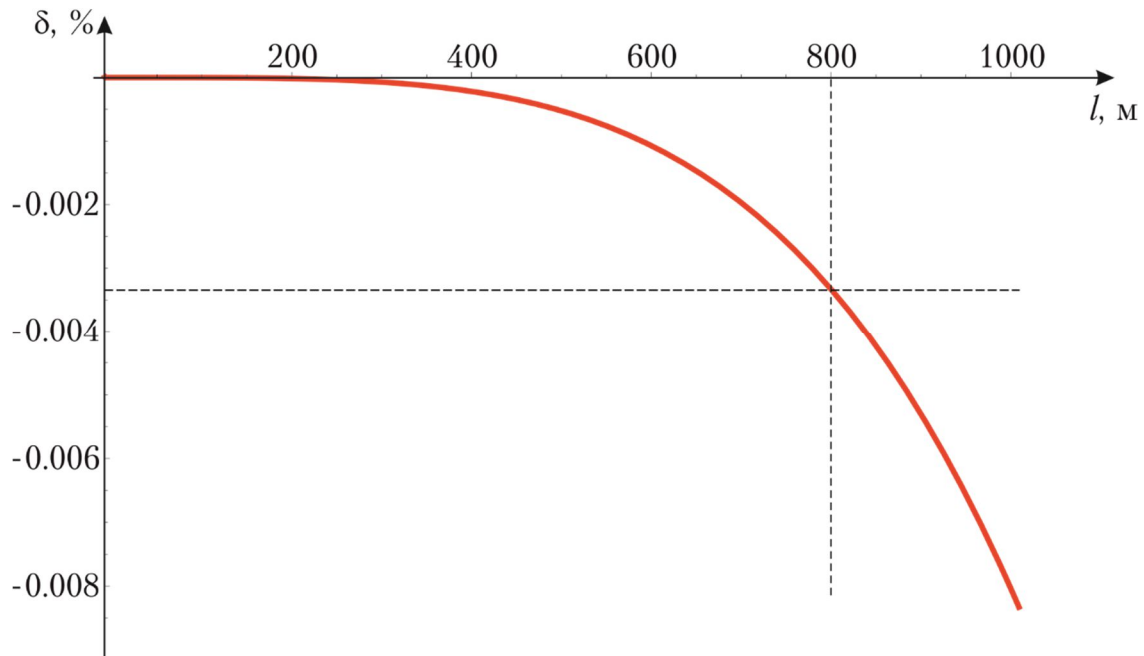


Рис. 2.7. Залежність похибки моделювання кривої провисання проводу за допомогою параболи четвертого ступеню від довжини прогону

Рівняння ланцюгової лінії (2.24) та параболи (2.27), які описують криву провисання проводу в прогоні отримані в системі координат, пов'язаній з нижньою точкою провисання проводу. Зазначимо, що така система координат не є фіксованою та переміщується протягом періоду експлуатації повітряної лінії. Так, наприклад, збільшення температури повітря обумовлює теплове здовження проводу та зниження нижньої точки його провисання. В підрозділі 2.3 буде показано, що за умови перепаду висот точок закріплення проводу на суміжних опорах спостерігається горизонтальне переміщення нижньої точки провисання проводу внаслідок зміни кліматичних умов в районі траси лінії. Тому в задачах механічних розрахунків повітряних ліній часто використовують системи координат, прив'язані до однієї з точок закріплення проводу на опорі, як показано на рис. 2.8.

В такий системі координат рівняння ланцюгової лінії набуває вигляду

$$y = \frac{2\sigma_o}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{2\sigma_o} x \right) \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{2\sigma_o} (l - x) - \operatorname{tg} \theta \right), \quad (2.29)$$

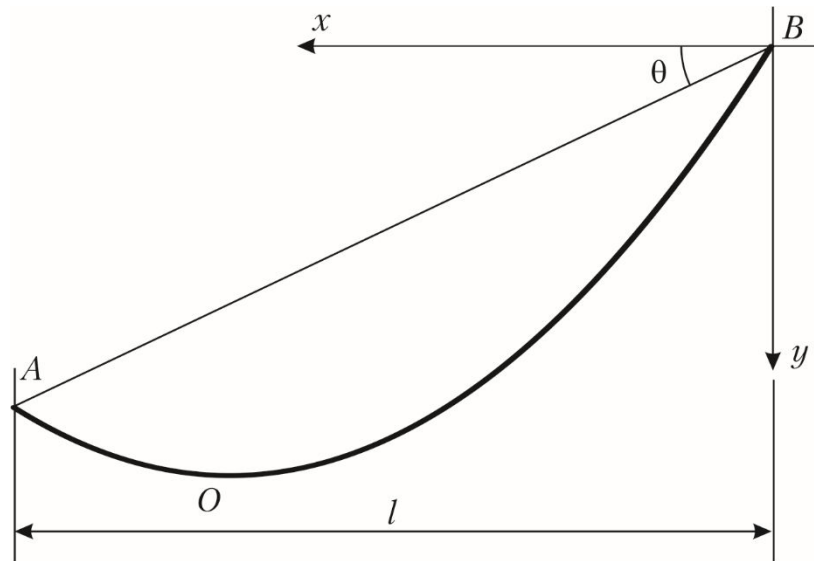


Рис. 2.8. Крива провисання проводу в системі координат, прив'язаної до точки закріплення проводу на опорі

де θ – кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводу на опорах до горизонталі (див. рис. 2.8).

Рівняння параболи, своєю чергою, має вигляд

$$y = \frac{\gamma}{2\sigma_0} x(l - x) + x \operatorname{tg} \theta. \quad (2.30)$$

У разі, коли провід розташовано дзеркально по відношенню до показаного на рис. 2.8 (точка А закріплення проводу знаходиться вище точки В), у вирази (2.29) та (2.30) слід підставляти від'ємне значення кута нахилу θ .

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення ланцюгової лінії.
2. Наведіть рівняння ланцюгової лінії для моделювання кривої провисання проводу у прогоні.
3. Поясніть можливість застосування рівняння параболи для моделювання кривої провисання проводу у прогоні.
4. Зазначте та поясніть обмеження застосування рівняння параболи для моделювання кривої провисання проводу у прогоні.
5. Поясніть переваги системи координат, пов'язаної з точкою закріплення проводу на опорі.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 82-83; [16], с. 61-64.

2.3. СТІЛА ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

Стрілою провисання називають відстань по вертикалі між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та проводом у середині опори [16], як показано на рис. 2.9, де стрілу провисання проводу позначено латинською літерою f .

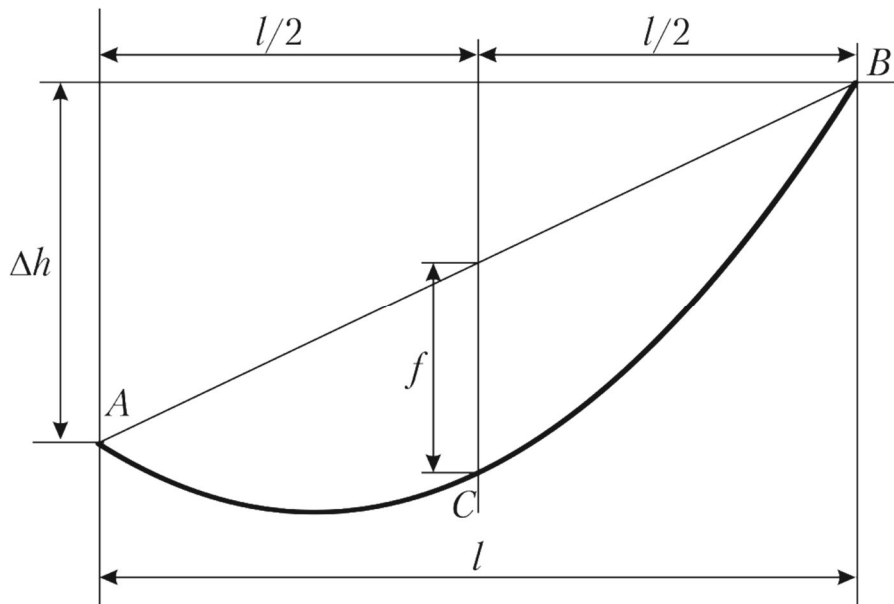


Рис. 2.9. Стріла провисання проводу

В окремому випадку, за умови однакових висот закріплення проводів на суміжних опорах стрілою провисання є відстань по вертикалі між точкою закріплення проводу на опорі та нижньою точкою провисання проводу, як показано на рис. 2.10. За такої умови стрілу провисання проводу можна визначити з рівняння кривої провисання проводу в прогоні (2.27) за умови $x = l/2$, де l – довжина прогону:

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}, \quad (2.31)$$

де γ – питоме навантаження, яке зазнає провід; σ_0 – напруження проводу в нижній точці провисання.

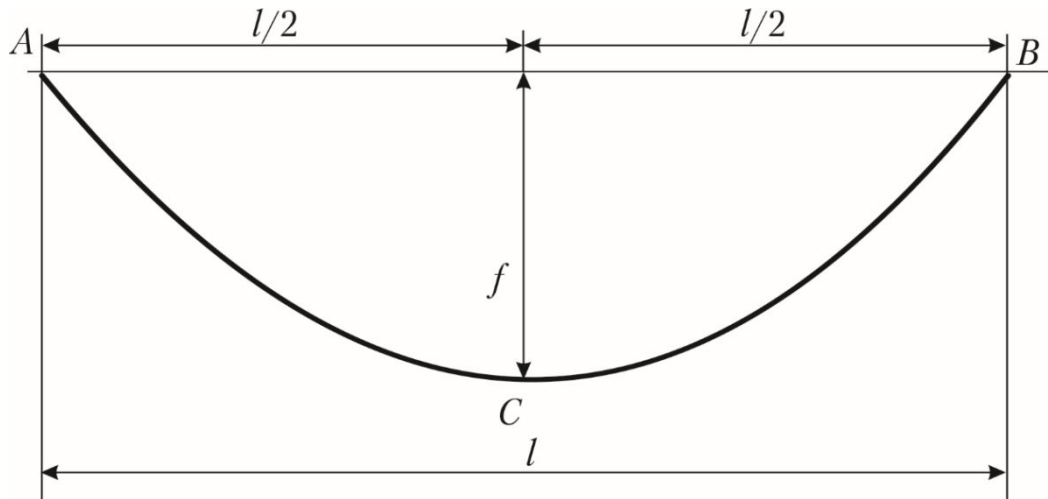


Рис. 2.10. Ілюстрація до визначення стріли провисання проводу за умови однакових висот закріплення проводів

Розглянемо загальний випадок визначення стріли провисання проводу за різних відміток закріплення проводів на суміжних опорах, що проілюстровано на рис. 2.11, де A, B – точки закріплення проводу на опорах; O – нижня точка провисання проводу до якої прив'язана прямокутна система координат; A', B' – точки, симетричні відносно вертикальної вісі кривої провисання проводу; C – точка на кривій провисання проводу в середині прогону; l – довжина прогону; Δh – перепад висот точок закріплення проводу; θ – кут нахилу прямої, що з'єднує точки закріплення проводу, до горизонталі; a, b – горизонтальні відстані між опорами до нижньої точкою провисання проводу; x_c, y_c – горизонтальний та вертикальний зсув точки C відносно початку координат; f – стріла провисання проводу.

Для даного способу закріплення проводів визначають малий та великий еквівалентні прогони.

Малий еквівалентний прогін визначають як ділянку між точкою закріплення проводу на нижній відмітці та точкою на кривій провисання проводу, симетричною відносно вісі параболи [16, 34]. На рис. 2.11 малий еквівалентний прогін визначається ділянкою між точками A та A' . Довжина малого еквівалентного прогону, очевидно, дорівнює $2a$, а f_a позначено стрілу провисання малого еквівалентного прогону.

Відповідно до виразу (2.31) стріла провисання проводу малого еквівалентного прогону дорівнює

$$f_a = \frac{\gamma a^2}{2\sigma_0}.$$

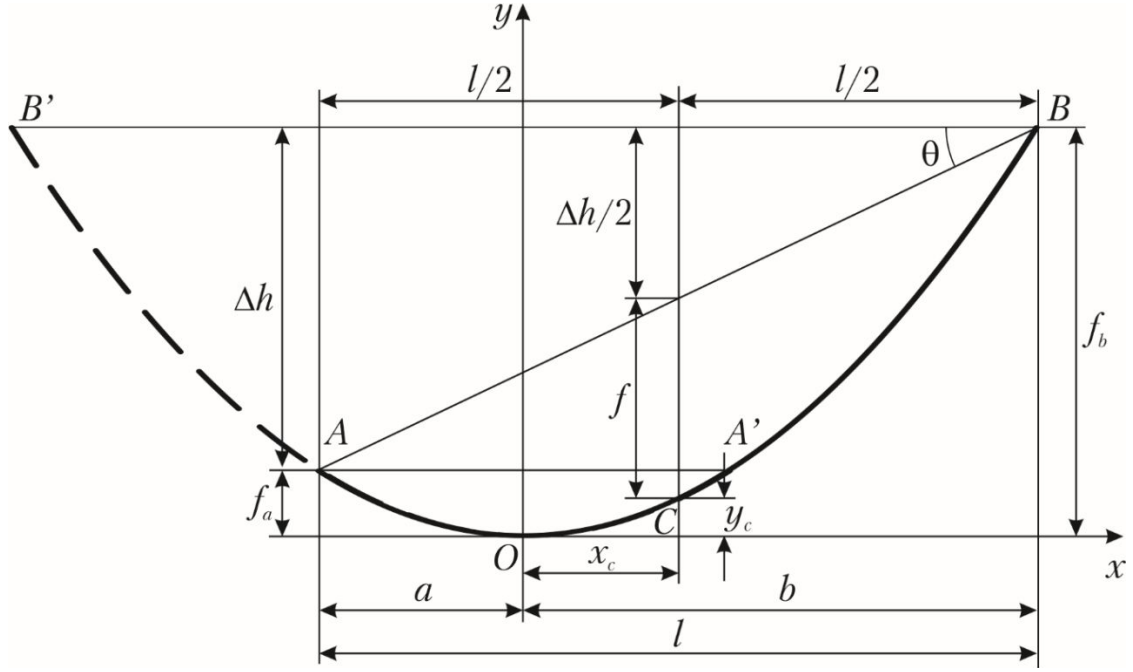


Рис. 2.11. Ілюстрація до визначення стріли провисання проводу

Аналогічно визначають великий еквівалентний прогін, як ділянку між точкою закріплення проводу на верхній відмітці та точкою на продовженні кривої провисання проводу, симетричною відносно вісі параболі [16, 34]. Для прогону, представленого на рис. 2.14 великий еквівалентний прогін визначається ділянкою між точками B та B' . Довжина великого еквівалентного прогону, очевидно, дорівнює $2b$, а f_b – стріла провисання великого еквівалентного прогону:

$$f_b = \frac{\gamma b^2}{2\sigma_o}.$$

Очевидно, що для прогону справедливе співвідношення

$$b = l - a. \quad (2.32)$$

Різниця відміток закріплення проводів на суміжних опорах дорівнює

$$\Delta h = f_b - f_a = \frac{\gamma}{2\sigma_o} (b^2 - a^2) = \frac{\gamma l}{2\sigma_o} (l - 2a). \quad (2.33)$$

З рівнянь (2.33) та (2.32) випливає

$$\begin{aligned} a &= \frac{l}{2} - \frac{\sigma_o \Delta h}{\gamma l} = \frac{l}{2} - \frac{\sigma_o}{\gamma} \operatorname{tg} \theta; \\ b &= \frac{l}{2} + \frac{\sigma_o \Delta h}{\gamma l} = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_o}{\gamma} \operatorname{tg} \theta. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що координата нижньої точки провисання проводу визначається не лише різницею відміток закріплення проводу на опорах (кутом нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводу на опорах), але й механічними навантаженням та напруженням проводу. Це означає, що зміна кліматичних умов експлуатації повітряних ліній електропередавання обумовлює горизонтальне переміщення нижньої точки провисання проводу.

Відповідно до схеми провисання проводу у прогоні, представленої на рис. 2.11 стрілу провисання можна визначити за виразом

$$f = f_b - \frac{\Delta h}{2} - y_c, \quad (2.35)$$

де

$$f_b = \frac{\gamma}{2\sigma} \left(\frac{l}{2} + \frac{\sigma_0 \Delta h}{\gamma l} \right)^2.$$

З рис. 2.11 випливає

$$x_c = b - \frac{l}{2} = \frac{\sigma_0 \Delta h}{\gamma l}. \quad (2.36)$$

Виходячи з рівняння кривої провисання проводу (2.27)

$$y_c = \frac{\gamma x_c^2}{2\sigma_0} = \frac{\gamma}{2\sigma_0} \frac{\sigma_0^2}{\gamma^2} \left(\frac{\Delta h}{l} \right)^2 = \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left(\frac{\Delta h}{l} \right)^2.$$

Тоді вираз (2.35) для визначення стріли провисання набуває вигляду

$$f = \frac{\gamma}{2\sigma_0} \left(\frac{l}{2} + \frac{\sigma_0 \Delta h}{\gamma l} \right)^2 - \frac{\Delta h}{2} - \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left(\frac{\Delta h}{l} \right)^2 = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0} \pm \frac{\Delta h}{2} \pm \frac{\sigma_0}{2\gamma} \left(\frac{\Delta h}{l} \right)^2 = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0}. \quad (2.37)$$

Аналіз отриманого результату свідчить про те, що формула (2.37) повністю ідентична виразу (2.31), тобто стріла провисання проводу в прогоні не залежить від способу закріплення проводів на суміжних опорах та визначається лише характеристиками проводу та кліматичними умовами функціонування повітряної лінії.

Вираз (2.31) для визначення стріли провисання проводу отримано виходячи з моделювання кривої провисання проводу у вигляді параболи (2.27), що неприпустимо для великих прогонів довжиною 800-1000 м та більше, оскільки дає істотну похибку (див. рис. 2.5). Для таких прогонів стрілу провисання слід визначати, базуючись на рівнянні кривої провисання проводу (2.28), отриманого розкладанням рівняння ланцюгової лінії (2.24) в ступеневий ряд, обмежений трьома складовими, за виразом

$$f = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0} + \frac{\gamma^3 l^4}{384\sigma_0^3}. \quad (2.38)$$

Зазначимо, що чинні нормативні документи [47] містять некоректне визначення стріли провисання проводу у прогоні як відстань по вертикалі між прямою, яка з'єднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та нижньою точкою провисання проводу у прогоні, що не дозволяє застосувати вираз (2.31) для визначення стріли провисання.

У цьому разі стрілу провисання проводу слід визначати за схемою на рис. 2.12. На рисунку Δa , Δb – відстані по вертикалі між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на опорах та горизонталями на рівнях нижньої та верхньої точок закріплення над нижньою точкою провисання відповідно.

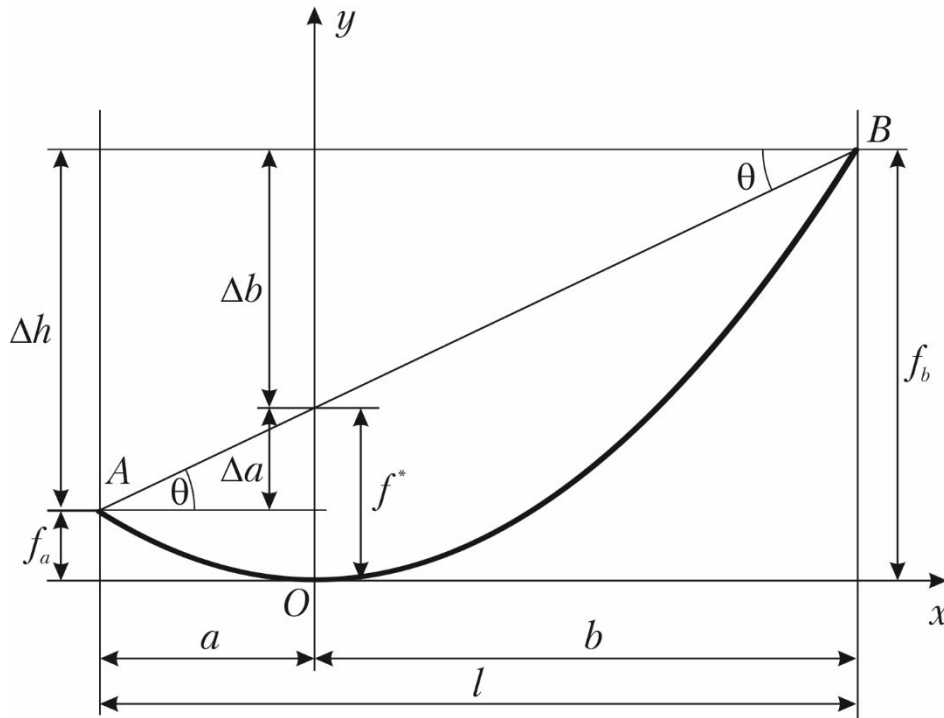


Рис. 2.12. Ілюстрація до визначення стріли провисання проводу за ПУЕ

Відповідно до схеми на рис. 2.12 стрілу провисання проводу можна визначити за виразами

$$f^* = f_a + \Delta a = f_b - \Delta b,$$

де

$$\Delta a = \frac{\Delta h}{l} a = a \operatorname{tg} \theta; \quad \Delta b = \frac{\Delta h}{l} b = b \operatorname{tg} \theta.$$

Визначимо стрілу провисання проводу за стрілою малого еквівалентного прогону та величиною Δa

$$\begin{aligned}
 f^* = f_a + \Delta a &= \frac{\gamma \left(\frac{l}{2} - \frac{\sigma_o \Delta h}{\gamma l} \right)^2}{2\sigma_o} + \frac{\Delta h}{l} \left(\frac{l}{2} - \frac{\sigma_o \Delta h}{\gamma l} \right) = \\
 &= \frac{\gamma}{2\sigma_o} \left(\frac{l^2}{4} - \frac{\sigma_o^2 \Delta h^2}{\gamma^2 l^2} \right) = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_o} - \frac{\sigma_o \Delta h^2}{\gamma l^2} = f - \frac{\sigma_o}{\gamma} \operatorname{tg}^2 \theta,
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

де f – стріла провисання проводу в середині прогону.

Аналіз виразу (2.39) свідчить про те, що стріла провисання, визначена за [47] завжди менша за стрілу провисання в середині прогону на величину, обумовлену різницею висот закріплення проводу на суміжних опорах. Можна показати, що стріла провисання в середині прогону характеризується найбільшою відстанню між кривою провисання проводу та прямою, яка поєднує точки закріплення проводу на опорах. Дійсно в загальному випадку така відстань характеризується виразом

$$f_x = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_o} - \frac{\sigma_o \Delta h^2}{\gamma l^2} + \frac{\Delta h}{l} x - \frac{\gamma x^2}{2\sigma_o}. \tag{2.40}$$

Свого максимального значення відстань набуває в точці екстремуму функції (2.40), тобто за умови

$$f'_x = \frac{\Delta h}{l} - \frac{\gamma}{\sigma_o} x = 0,$$

або

$$x = \frac{\sigma_o \Delta h}{\gamma l}.$$

Порівняння отриманого виразу з (2.36) свідчить про те, що екстремум, а, отже, максимальне значення функції (2.40) має місце в середині прогону.

В практиці проектування та експлуатації повітряних ліній електропередавання практичний зміст має задача визначення відстані між нижнім проводом та землею, або інженерною спорудою під лінією. У цьому разі криву провисання проводу та стрілу провисання зручніше визначати в системі координат, пов'язаній із точкою закріплення проводу на опорі, як показано на рис. 2.13. В такій системі координат крива провисання проводу має вигляд (2.30), а стріла провисання визначається виразом

$$f_x = y - x \operatorname{tg} \theta = \frac{\gamma x}{2\sigma_o} (l - x). \tag{2.41}$$

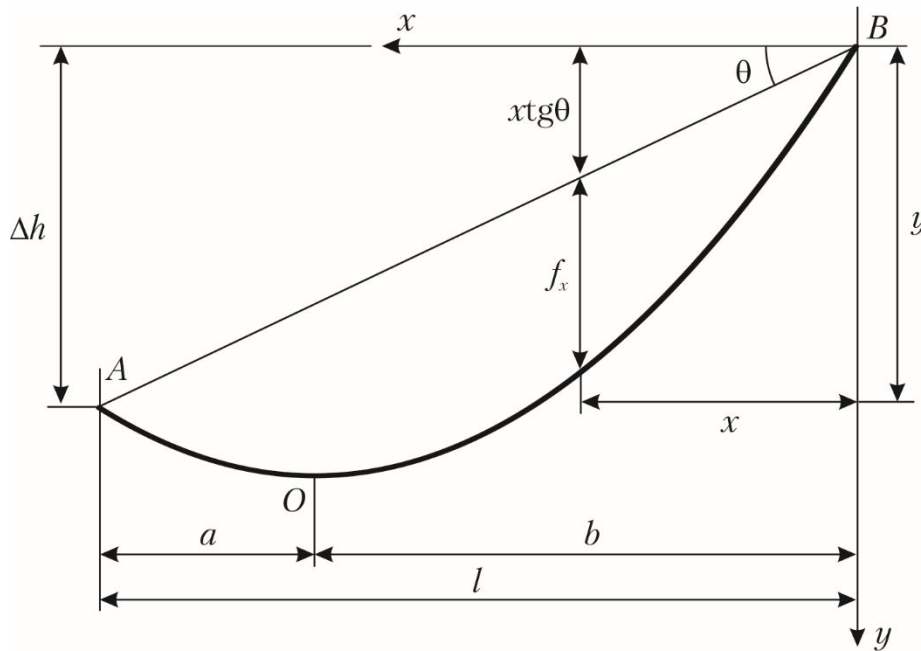


Рис. 2.13. Визначення стріли провисання на будь-якій відстані від опори

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення стріли провисання проводу у прогоні.
2. Наведіть вираз для визначення стріли провисання проводу.
3. Дайте визначення малого та великого еквівалентних прогонів.
4. Поясніть переміщення координати нижньої точки провисання проводу у прогоні протягом періоду експлуатації лінії.
5. За яких умов координата нижньої точки провисання проводу протягом року не буде змінюватися?
6. Поясніть некоректність визначення стріли провисання за ПУЕ.
7. Наведіть вираз для визначення стріли провисання в будь-якій точці прогону в системі координат прив'язаної до точки закріплення проводу на опорі.
8. Доведіть, що стріла провисання набуває свого найбільшого значення в середині прогону за будь-якого способу закріплення проводів на опорах.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 83-88; [16], с. 95-97; [34], с. 39-42; [63], с. 515-518.

2.4. ТЯЖІННЯ В МАТЕРІАЛІ ПРОВОДУ

Тяжінням називають силу, направлену на розтягування проводу, яка виникає внаслідок дії на провід навантаження від власної ваги та зовнішніх навантажень, зокрема, ваги ожеледі та натиску вітру [16]. Тяжіння є рівномірно розподіленим вздовж довжини проводу та направлене за дотичною до кривої провисання у кожній точці проводу.

Розглянемо відрізок проводу між нижньою точкою його провисання та довільною точкою у прогоні, як показано на рис. 2.14. Дію відкинутих частин проводу замінено зосередженими силами тяжіння H в нижній точці провисання O та T_A в точці A . Такі сили діють у напрямку дотичних до кривої провисання проводу, тобто горизонтально у точці O та під кутом α в точці A . Крім того провід зазнає рівномірно розподіленого навантаження від власної ваги проводу, представленою на рис. 2.14 зосередженою силою px , направленою вертикально униз та прикладеною в центрі мас середині горизонтальної проекції відрізка проводу, де p – одиничне навантаження, яке зазнає провід; x – довжина горизонтальної проекції відрізка проводу. Тут умовно вважається, що навантаження від власної ваги проводу рівномірно розподілене не вздовж довжини проводу, а вздовж довжини прогону.

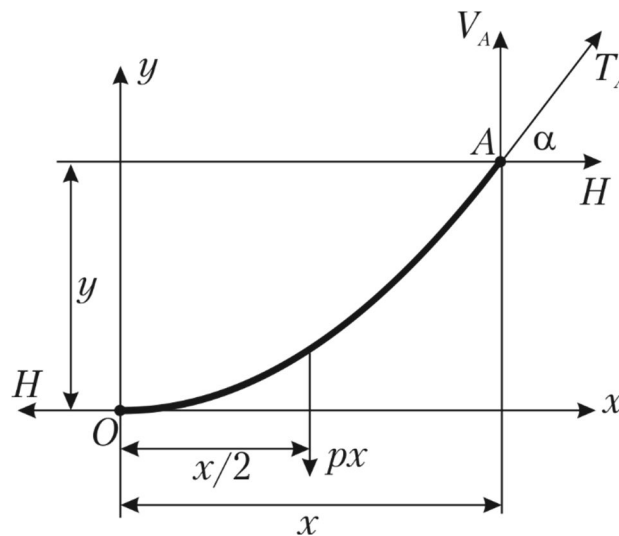


Рис. 2.14. Визначення тяжіння в проводі

Запишемо рівняння рівноваги сил, які діють на відрізок проводу у векторній формі

$$\vec{H} + \vec{T}_A + \vec{p}x = 0. \quad (2.42)$$

Розкладемо векторні величини рівняння (2.42) на горизонтальні та вертикальні складові:

$$\begin{cases} -H + T_A \cos \alpha = 0; \\ -px + T_A \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (2.43)$$

Аналіз рівнянь (2.43) дозволяє зробити такі висновки.

1. Горизонтальна складова тяжіння в матеріалі проводу є сталою величиною у прогоні і дорівнює тяжінню у нижній точці провисання проводу (даний висновок підтверджує міркування, наведені в підрозділі 2.2 – див. вираз (2.17)).

2. Вертикальна складова тяжіння визначається вагою частини проводу між нижньою точкою його провисання та поточною точкою у прогоні

$$V_x = px.$$

3. Найбільшого значення тяжіння в матеріалі проводу набуває у точці закріплення проводу на опорі, тобто у верхній точці провисання проводу. В цій точці вертикальна складова тяжіння за однакової висоти точок закріплення проводу дорівнює

$$V = p \frac{l}{2}.$$

У разі перепаду висот точок закріплення проводу в прогоні, як показано на рис. 2.15, вертикальну складову тяжіння в точках закріплення визначають за виразами

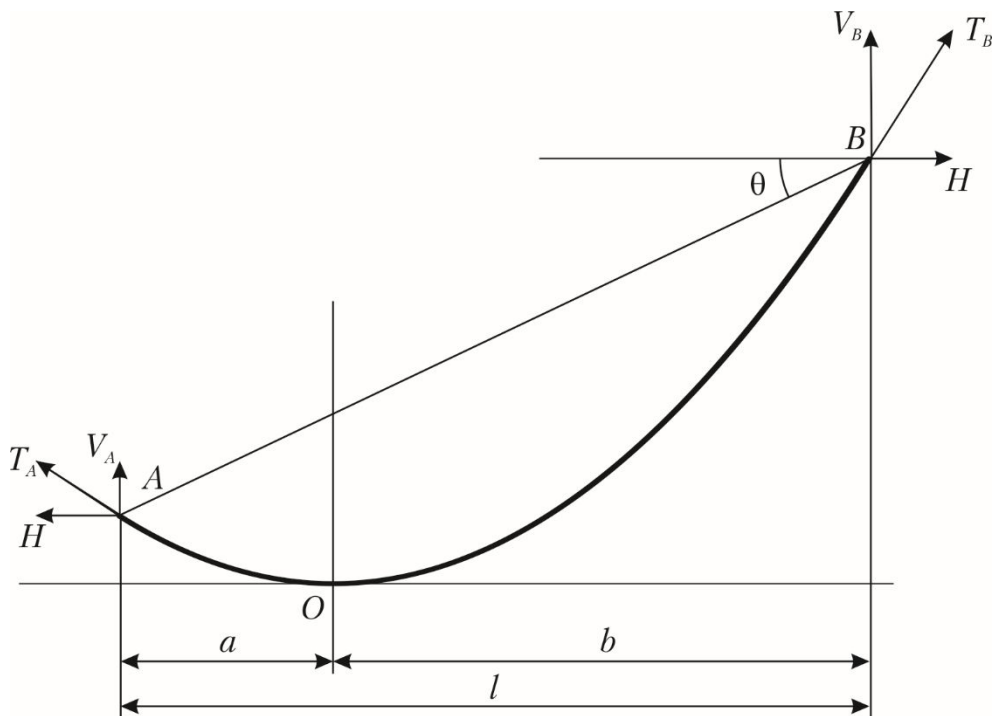


Рис. 2.15. Тяжіння в точках закріплення проводу

$$\begin{aligned} V_A &= pa = p \left(\frac{l}{2} - \frac{H}{p} \frac{\Delta h}{l} \right) = p \frac{l}{2} - H \operatorname{tg} \theta; \\ V_B &= pb = p \left(\frac{l}{2} + \frac{H}{p} \frac{\Delta h}{l} \right) = p \frac{l}{2} + H \operatorname{tg} \theta, \end{aligned} \quad (2.44)$$

де a, b – горизонтальні відстані між нижньою точкою провисання проводу до відповідної опори; Δh – перепад висот точок закріплення проводу в прогоні; θ – кут нахилу прямої, що поєднує точки закріплення проводу до горизонталі.

Аналіз виразів (2.44) свідчить про те, що у разі перепаду висот точок закріплення проводу на суміжних опорах вертикальна складова тяжіння в цих точках перерозподіляється пропорційно горизонтальній складовій тяжіння та тангенсу кута нахилу до горизонталі прямої, яка поєднує точки закріплення проводу. Вертикальна складова тяжіння в нижній точці закріплення проводу зменшується, а в верхній – збільшується на однакову величину.

Тяжіння в довільній точці проводу дорівнює

$$T_x = \sqrt{H^2 + (px)^2} = H \sqrt{1 + \left(\frac{px}{H} \right)^2}. \quad (2.45)$$

Розкладемо вираз (2.45) у біноміальний ряд, обмежений першими двома членами:

$$T_x \approx H \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{px}{H} \right)^2 \right) = H + p \frac{px^2}{2H} = H + py, \quad (2.46)$$

де y – вертикальна відстань між нижньою точкою провисання та поточною точкою проводу.

Таким чином, тяжіння та механічне напруження в точці закріплення проводу на опорі за однакової висоти його закріплення дорівнюють

$$\begin{aligned} T &= H + pf; \\ \sigma &= \sigma_o + \gamma f, \end{aligned} \quad (2.47)$$

де σ_o – напруження проводу у нижній точці провисання; f – стріла провисання проводу.

Спрощення математичної моделі для визначення тяжіння за виразом (2.46), очевидно, обумовлює похибку розрахунків, яка збільшується із віддаленням від нижньої точки провисання проводу. На рис. 2.16 представлена залежність похибки визначення тяжіння в точках закріплення проводу марки АС-400/64 за виразом (2.46) від довжини прогону.

Аналіз даних, наведених на рис. 2.16 свідчить про те, що похибка у визначенні тяжіння є додатною, тобто тяжіння, визначене за виразом

(2.46) дещо більше за фактичне. Разом з тим така похибка є зневажливо малою та збільшується із збільшенням довжини прогону. Це свідчить про допустимість застосування виразу (2.46) для визначення тяжіння у будь-яких точках проводу для типових конструкцій повітряних ліній.

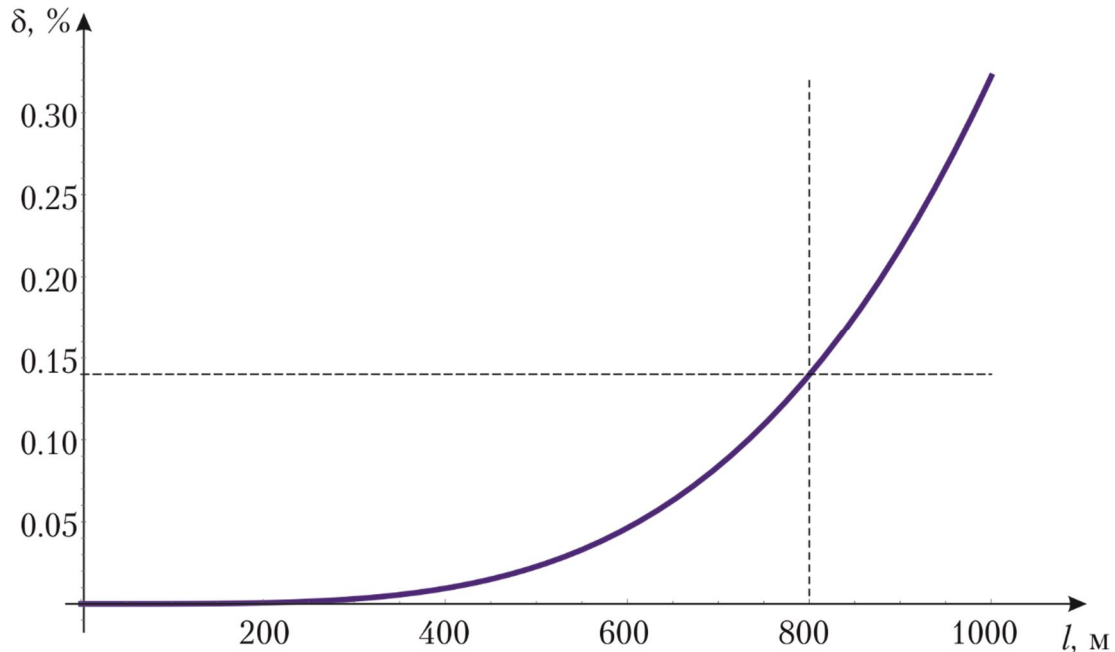


Рис. 2.16. Залежність похибки у визначенні тяжіння від довжини прогону

Вираз (2.47) свідчить про те, що тяжіння в матеріалі проводу в точках його закріплення на опорах містить дві складові – тяжіння в нижній точці провисання, обумовлене натягом проводу під час його монтажу, та вагою частини проводу між нижньою точкою провисання та точкою закріплення проводу на опорі.

У разі закріплення проводу на різних відмітках (див. рис. 2.15) вираз (2.47) набуває вигляду

$$\begin{aligned} T_A &= H + pf_a; \\ T_B &= H + pf_b, \end{aligned} \quad (2.48)$$

де f_a, f_b – стріли провисання малого та великого еквівалентного прогонів відповідно.

Для типових конструкцій повітряних ліній високої напруги друга складова у виразах (2.47) та (2.48) не перевищує 5% від сумарного тяжіння [6], що проілюстровано, наприклад, для проводу марки АС-400/64 на рис. 2.17. Тому чинні норми проектування повітряних ліній електропередавання допускають перевищення механічного напруження у матеріалі проводу у точках закріплення на опорах над гранично допустимими значеннями не більше ніж на 5%.

Таким чином, допустимо проводити аналіз механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній за тільки горизонтальною складовою тяжіння проводу, нехтуючи вертикальною та за механічним напруженням в нижній точці провисання проводу. В подальших викладках під тяжінням та механічним напруженням будемо розуміти значення відповідних параметрів у нижній точці провисання проводу.

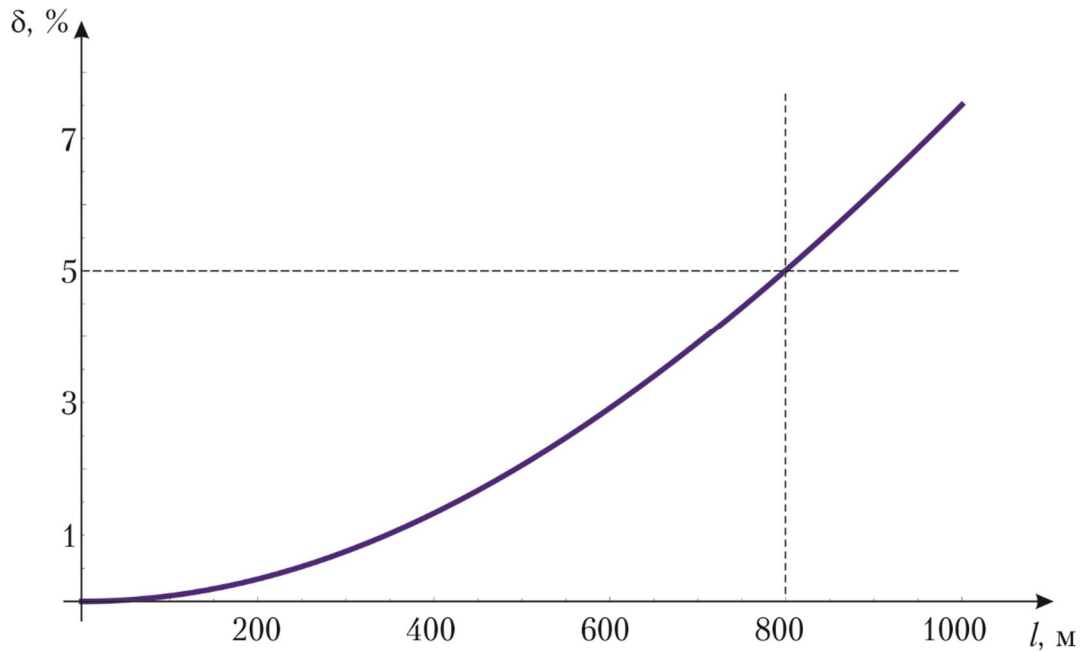


Рис. 2.17. Залежність похибки нехтування вертикальною складовою тяжіння від довжини прогону

Сумісне розв'язання рівнянь (2.43) дозволяє визначити кут нахилу дотичної до кривої провисання проводу, яка визначає напрям вектору тяжіння у будь-якій точці проводу

$$\operatorname{tg} \alpha_x = \frac{px}{H} = \frac{\gamma x}{\sigma}. \quad (2.49)$$

Для заданих координат точки кривої провисання проводу положення дотичної можна визначити за виразом

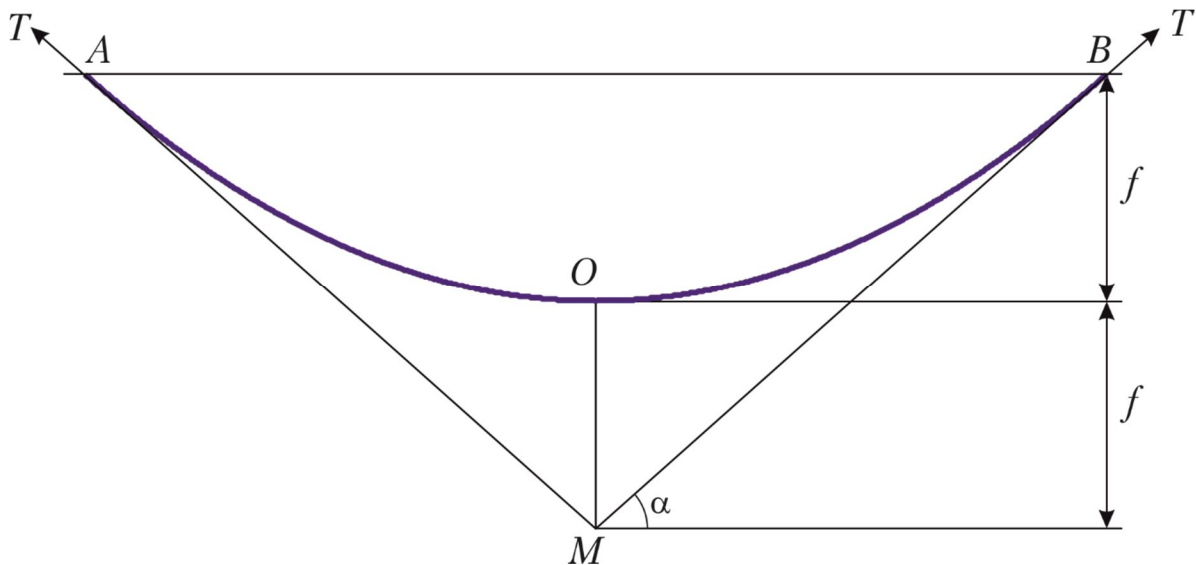
$$\operatorname{tg} \alpha_x = \frac{2y}{x},$$

отриманим шляхом сумісного розв'язання рівнянь (2.49) та (2.27).

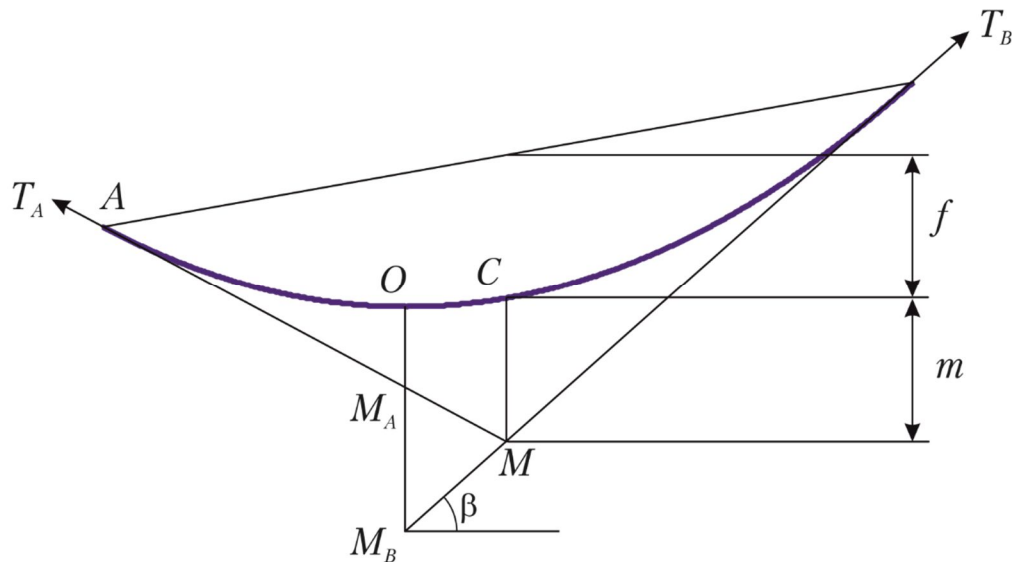
Положення дотичних в точках закріплення проводу, розташованих на однаковій висоті визначають за виразом (2.49) шляхом підстановки горизонтальних координат точок закріплення проводу $x = \pm l/2$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \pm \frac{pl}{2H} = \pm \frac{\gamma l}{2\sigma} = \pm \frac{4f}{l}.$$

Графічна побудова дотичних до параболи, які визначають напрями векторів тяжіння в точках закріплення проводу проілюстрована на рис. 2.18 [7, 34]. У разі розташування точок закріплення проводу на однаковій висоті (див. рис. 2.18 *a*) від нижньої точки провисання проводу вертикально вниз необхідно відкласти відрізок, довжина якого дорівнює стрілі провисання проводу (відрізок OM на рис. 2.18 *a*). Отриману точку M з'єднують з точками закріплення проводу на опорах (точки A та B). Такі лінії визначають напрями дотичних до параболи в точках закріплення проводу.



a) у разі закріплення проводу на однаковій висоті



б) у разі перепаду висот точок закріплення проводу на опорах

Рис. 2.18. Побудова дотичних до параболи

У разі перепаду висот точок закріплення проводу на суміжних опорах (див. рис. 2.18 б) від нижньої точки провисання проводу необхідно відкласти відрізки, довжини яких дорівнюють малому та великому еквівалентним прогонам відповідно (відрізки OM_A та OM_B) та поєднати отримані точки із відповідними точками закріплення проводу.

Інший спосіб побудови полягає в наступному. За умовами рівноваги механічної системи всі зовнішні сили, які діють на провід мають перетинатися в одній точці, розташованій посередині прогону на певній відстані від точки C . З рис. 2.18 б випливає співвідношення

$$\frac{l}{2} \operatorname{tg} \beta = m + f + \frac{\Delta h}{2}, \quad (2.50)$$

де $\operatorname{tg} \beta = \frac{pl_b}{2H} = \frac{p}{H} \left(\frac{l}{2} + \frac{H\Delta h}{pl} \right) = \frac{pl}{2H} + \frac{\Delta h}{l}$; l_b – довжина великого еквівалентного прогону.

Таким чином, рівняння (2.50) набуває вигляду

$$\frac{l}{2} \left(\frac{pl}{2H} + \frac{\Delta h}{l} \right) = m + f + \frac{\Delta h}{2},$$

звідки

$$m = f.$$

Отже, для графічної побудови дотичної необхідно від точки на проводі посередині прогону відкладають відрізок, , довжина якого дорівнює стрілі провисання проводу (відрізок CM на рис. 2.18 б). Отриману точку M з'єднують з точками закріплення проводу на опорах, що визначає напрями дотичних до параболи в точках закріплення проводу.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення тяжіння в матеріалі проводу.
2. Поясніть фізичний зміст горизонтальної та вертикальної складових тяжіння в матеріалі проводу.
3. В якій точці проводу тяжіння набуває свого найбільшого значення?
4. Поясніть допустимість проведення механічних розрахунків тільки за горизонтальною складовою тяжіння проводу.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 88-95; [16], с. 64-65, 97-99; [34], с. 43-46.

2.5. ДОВЖИНА ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

Для визначення довжини проводу у прогоні необхідно розрахувати значення криволінійного інтегралу вздовж кривої провисання проводу у прогоні:

$$L = \int_l dl = \int_{-a}^b \sqrt{1 + y'^2} dx, \quad (2.51)$$

де y' – похідна від рівняння кривої провисання проводу; a, b – горизонтальні координати точок закріплення проводу на опорах відносно нижньої точки провисання, тобто відстані по горизонталі між відповідними опорами та нижньою точкою провисання проводу (див. рис. 2.16).

Для визначення довжини проводу у прогоні зручно користуватися рівнянням ланцюгової лінії для моделювання кривої провисання проводу:

$$y = \frac{\sigma}{\gamma} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) - 1 \right) \Rightarrow$$

$$y' = \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right); \quad \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right)} = \operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right).$$

Тоді вираз (2.51) для визначення довжини проводу у прогоні набуває вигляду

$$L = \int_{-a}^b \operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) dx = \frac{\sigma}{\gamma} \left(\operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{\sigma} b \right) + \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{\sigma} a \right) \right). \quad (2.52)$$

З урахуванням (2.34) вираз (2.52) набуває вигляду

$$L = \frac{2\sigma}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma}{2\sigma} (b + a) \right) \operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{2\sigma} (b - a) \right) = \frac{2\sigma}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right) \operatorname{ch} \left(\frac{\Delta h}{l} \right), \quad (2.53)$$

де Δh – перепад висот точок закріплення проводу в прогоні.

У разі закріплення проводу на суміжних опорах на однаковій висоті вираз (2.53) спрощується

$$L = \frac{2\sigma}{\gamma} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right). \quad (2.54)$$

Якщо скористатися розкладанням виразу (2.54) у ступеневий ряд обмежений першими членами, вираз для визначення довжини проводу у прогоні набуває вигляду

$$L \approx \frac{2\sigma}{\gamma} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} + \frac{1}{6} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right)^3 \right) = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2}, \quad (2.55)$$

або

$$L \approx l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l}. \quad (2.56)$$

Для визначення довжини проводу великих прогонів довжиною 800–1000 м та більше нехтування рівномірним розподілом навантаження вздовж довжини проводу призводить до суттєвих похибок у механічних розрахунках конструктивних елементів повітряної лінії. Тобто обмеження першими двома складовими розкладання гіперболічного синусу у ступеневий ряд не буде задовольняти вимогам інженерної точності. Тут необхідно скористатися виразом (2.54), або доповнити вираз (2.55) третім членом ступеневого ряду:

$$L \approx l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} + \frac{\gamma^4 l^5}{1920\sigma^4},$$

або

$$L \approx l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} + \frac{32}{15} \frac{f^4}{l^3}. \quad (2.57)$$

Розглянемо визначення довжини проводу у прогоні у разі перепаду висот закріплення проводу на суміжних опорах, як показано на рис. 2.19. Тут дугу ланцюгової лінії AOB поділяють на дві частини – дугу AO та дугу OB . Очевидно, довжина кожної з цих дуг дорівнює половині довжин проводу малого та великого еквівалентних прогонів відповідно. Тобто довжину проводу можна визначити за виразом

$$L = \frac{1}{2}(L_{e1} + L_{e2}),$$

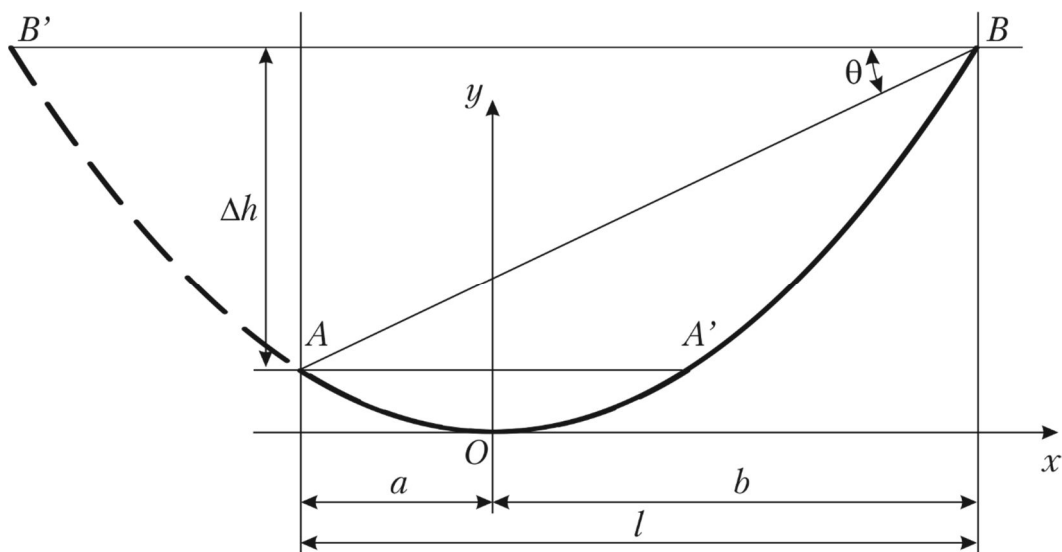


Рис. 2.19. Визначення довжини проводу у разі перепаду висот точок закріплення

де L_{e1} , L_{e2} – довжини проводу малого та великого еквівалентних прогонів відповідно.

Відповідно до виразу (2.55)

$$L_{e1} = 2a + \frac{\gamma^2 (2a)^3}{24\sigma^2};$$

$$L_{e2} = 2b + \frac{\gamma^2 (2b)^3}{24\sigma^2},$$

де a , b – горизонтальні відстані між опорами та нижньою точкою провисання проводу.

Таким чином, довжина проводу у прогоні становить

$$L = \frac{1}{2} \left(2a + \frac{\gamma^2 (2a)^3}{24\sigma^2} + 2b + \frac{\gamma^2 (2b)^3}{24\sigma^2} \right) = l + \frac{\gamma^2}{6\sigma^2} (a^3 + b^3). \quad (2.58)$$

З урахуванням (2.34) вираз (2.58) набуває вигляду

$$L = l + \frac{\gamma^2}{8\sigma^2} \left(\left(\frac{l}{2} - \frac{\sigma \Delta h}{\gamma l} \right)^3 + \left(\frac{l}{2} + \frac{\sigma \Delta h}{\gamma l} \right)^3 \right) = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} + \frac{\Delta h^2}{2l} =$$

$$= l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} + \frac{\Delta h^2}{2l} = l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} + l \operatorname{tg}^2 \theta,$$

де Δh – перепад висот точок закріплення проводу на опорах; θ – кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводу на опорах до горизонталі.

Для типових конструкцій повітряних ліній довжина прогону більше, чим на порядок перевищує стрілу провисання проводу і складова $\frac{8}{3} \frac{f^2}{l}$ у виразі (2.56), зазвичай, не перевищує 2–2,5% довжини прогону, як показано на рис. 2.20 для проводу марки АС-400/64. Це свідчить про коректність допущення про рівномірний розподіл ваги проводу вздовж довжини прогону, а не вздовж довжини проводу.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Наведіть вирази для визначення довжини проводу у прогоні, довжина якого не перевищує 800 м.
2. Наведіть вирази для визначення довжини проводу у прогоні, довжина якого перевищує 800 м.
3. Яким чином визначають довжину проводу у прогоні за перепаду висот точок його закріплення на опорах?

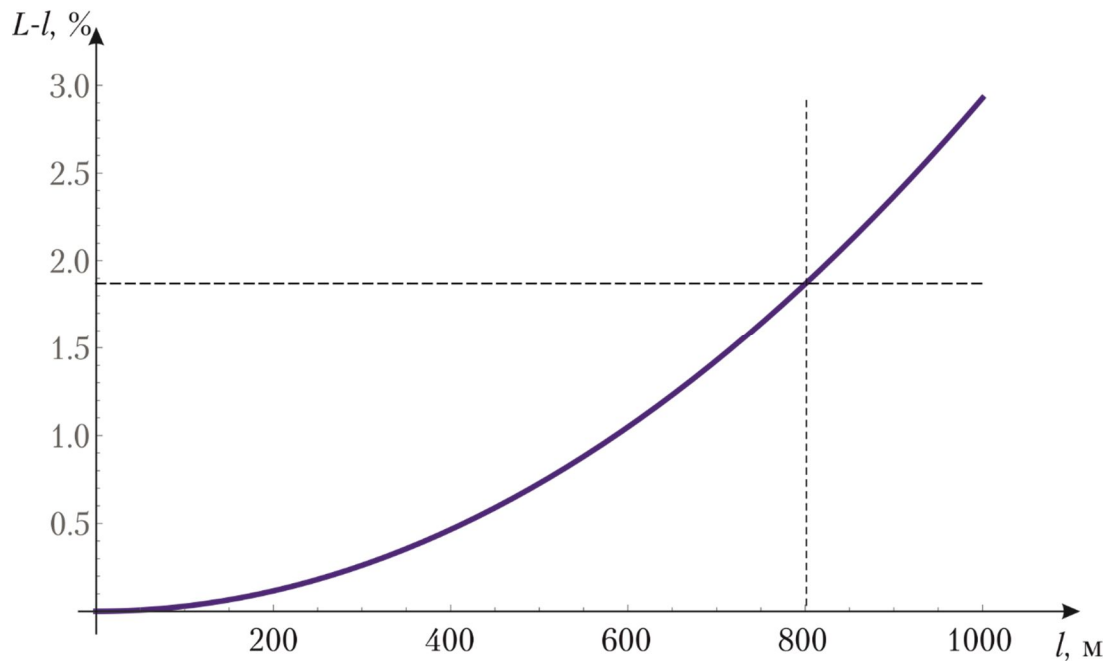


Рис. 2.20. Залежність різниці довжини проводу та довжини прогону від довжини прогону

4. Поясніть коректність допущення про рівномірний розподіл ваги проводу вздовж прогону.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 96-98; [63], с. 518-519.

2.6. ВИСОТА РОЗТАШУВАННЯ ЦЕТРУ МАС ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

Відомо, що кліматичні навантаження на проводи та троси повітряної лінії визначаються висотою їх розташування над поверхнею землі [34]. Так, збільшення висоти розташування проводів призводить до збільшення навантажень, обумовлених відкладеннями ожеледі та вітровим натиском. Це означає, що для виконання механічних розрахунків конструкцій повітряних ліній необхідно обов'язково враховувати фактичне положення проводів та тросів у просторі. Кліматичні навантаження на проводи та троси розраховують для висоти розташування над землею центрів мас відповідних елементів лінії.

Відомо, що ординату центру мас матеріальної лінії визначають за виразом

$$y_c = \frac{M_x}{L},$$

де $M_x = \int_{-a}^b y \sqrt{1 + y'^2} dx$ – момент інерції матеріальної лінії відносно вісі абсцис; L – довжина лінії; y – аналітичний вираз кривої провисання проводу; y' – похідна від рівняння кривої провисання проводу; a, b – горизонтальні координати точок закріплення проводу на опорах відносно нижньої точки провисання, тобто відстані по горизонталі між відповідними опорами та нижньою точкою провисання проводу (див. рис. 2.9).

У разі моделювання кривої провисання проводу рівнянням ланцюгової лінії (2.24), момент інерції відносно вісі абсцис, розташований на висоті нижньої точки провисання проводу становить

$$\begin{aligned} M_x &= \int_{-a}^b \frac{\sigma}{\gamma} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) - 1 \right) \operatorname{ch} \left(\frac{\gamma}{\sigma} x \right) dx = \\ &= \frac{\sigma l}{2\gamma} - \frac{2\sigma^2}{\gamma^2} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right) \operatorname{ch} \left(\frac{\Delta h}{l} \right) + \frac{\sigma^2}{2\gamma^2} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{\sigma} \right) \operatorname{ch} \left(\frac{2\Delta h}{l} \right), \end{aligned} \quad (2.59)$$

де Δh – перепад висот точок закріплення проводу.

У разі закріплення проводу на опорах на однаковій висоті ($\Delta h=0$) вираз (2.59) набуває вигляду

$$M_x = \frac{\sigma l}{2\gamma} - \frac{2\sigma^2}{\gamma^2} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right) + \frac{\sigma^2}{2\gamma^2} \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma l}{\sigma} \right). \quad (2.60)$$

Після розкладання функції (2.60) в ступеневий ряд, обмежений першими членами, маємо

$$M_x \approx \frac{\sigma l}{2\gamma} - \frac{2\sigma^2}{\gamma^2} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} + \frac{1}{6} \left(\frac{\gamma l}{2\sigma} \right)^3 \right) + \frac{\sigma^2}{2\gamma^2} \left(\frac{\gamma l}{\sigma} + \frac{1}{6} \left(\frac{\gamma l}{\sigma} \right)^3 \right) = \frac{\gamma l^3}{24\sigma} = \frac{1}{3} fl.$$

В підрозділі 2.5 показано, що довжина проводу у прогоні майже не відрізняється від довжини прогону

$$L \approx l.$$

Таким чином, ордината центру маси дорівнює

$$y_c = \frac{f}{3}. \quad (2.61)$$

Висота розташування центру мас проводу (2.61) визначена для системи координат, суміщеної з нижньою точкою провисання проводу у прогоні. Така точка не є фіксованою та переміщується протягом періоду експлуатації лінії, зокрема із зміною температури проводу. Зручно використовувати систему координат, прив'язану до точки закріплення проводу на опорі, що дозволяє визначити висоту центру мас над поверхнею землі

$$h_c = h_0 - \frac{2}{3} f,$$

де h_0 – висота закріплення проводу на опорі над землею.

У разі закріплення проводів на суміжних опорах на різних висотах над землею, висоту розташування центру маси проводу визначають за виразом

$$h_c = \frac{h_1 + h_2}{2} - \frac{2}{3} f,$$

де h_1, h_2 – висоти розташування проводів на суміжних опорах.

Навантаження від відкладень ожеледі та вітрового натиску на проводи повітряної лінії обчислюють за висотою розташування зведеного центру мас всіх проводів, закріплених у прогоні, відповідно до виразу

$$h_{зв} = h_{сер} - \frac{2}{3} f_{max}, \quad (2.62)$$

де $h_{сер}$ – середня висота кріплення проводів до ізоляційних підвісів, яку відраховують від рівня землі в місцях встановлення опор; f_{max} – габаритна стріла провисання проводу – максимально допустима стріла провисання за умови забезпечення нормованої габаритної відстані між проводами лінії та землею або інженерною спорудою.

Габаритну стрілу провисання проводу можна визначити за виразом

$$f_{max} = h_0 - \Gamma, \quad (2.63)$$

де $h_0 = h_t - \lambda$ – висота закріплення проводу на нижній траверсі; h_t – висота нижньої траверси над землею; λ – довжина ізоляційного підвісу; Γ – нормована габаритна відстань під проводами до землі або інженерної споруди.

Розрахунок механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній часто проводять для анкерованої ділянки у цілому. Тут необхідно визначити середньозважену висоту розташування центрів мас проводів у прогонах анкерованої ділянки за виразом

$$h_c = \frac{\sum h_{ci} l_i}{\sum l_i},$$

де h_{ci} – висота розташування центру мас i -го прогону; l_i – довжина i -го прогону.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Наведіть вираз для визначення висоти розташування центру мас проволу у прогоні.
2. Наведіть вираз для визначення середньозваженої висоти розташування центрів мас провідів на анкерованій ділянці.

2.7. СТАН ПРОВОДУ, ЯКИЙ ЗАЗНАЄ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Розглянемо положення у просторі проволу, який зазнає горизонтального вітрового навантаження. Очевидно, що під дією такого навантаження провід відхиляється від вертикальної площини провисання.

Напрямок дії вітру приймемо горизонтальним та перпендикулярним до прогону. Це визначає взаємну перпендикулярність напрямів дії навантажень від ваги проволу та натиску вітру. Оскільки навантаження є рівномірно розподіленими, то співвідношення між ними вздовж прогону є сталою величиною

$$\frac{p_{\Gamma}}{p_{\text{В}}} = \text{const},$$

де $p_{\text{В}}$, p_{Γ} – вертикальне та горизонтальне одиничні навантаження відповідно.

Розглянемо провід, закріплений в точках A та B на однаковій висоті над землею, як показано на рис. 2.21. У разі відсутності вітру крива провисання проволу лежить на вертикальній площині $ABCD$. Положення проволу в даному режимі показано пунктирною лінією AOB . Під дією натиску вітру провід відхиляється від вертикальної площини та займає положення $AO'B$, представлене суцільною лінією у площині дії сумарного розподіленого навантаження $ABC'D'$, позначеного p .

Очевидно, нову площину провисання проволу $ABC'D'$ можна отримати шляхом повороту вертикальної площини $ABCD$ навколо горизонтальної вісі AB на кут, величина якого визначається співвідношенням між горизонтальним та вертикальним навантаженнями проволу. На рис. 2.21 такий кут позначено φ :

$$\text{tg } \varphi = \frac{p_{\Gamma}}{p_{\text{В}}}. \quad (2.64)$$

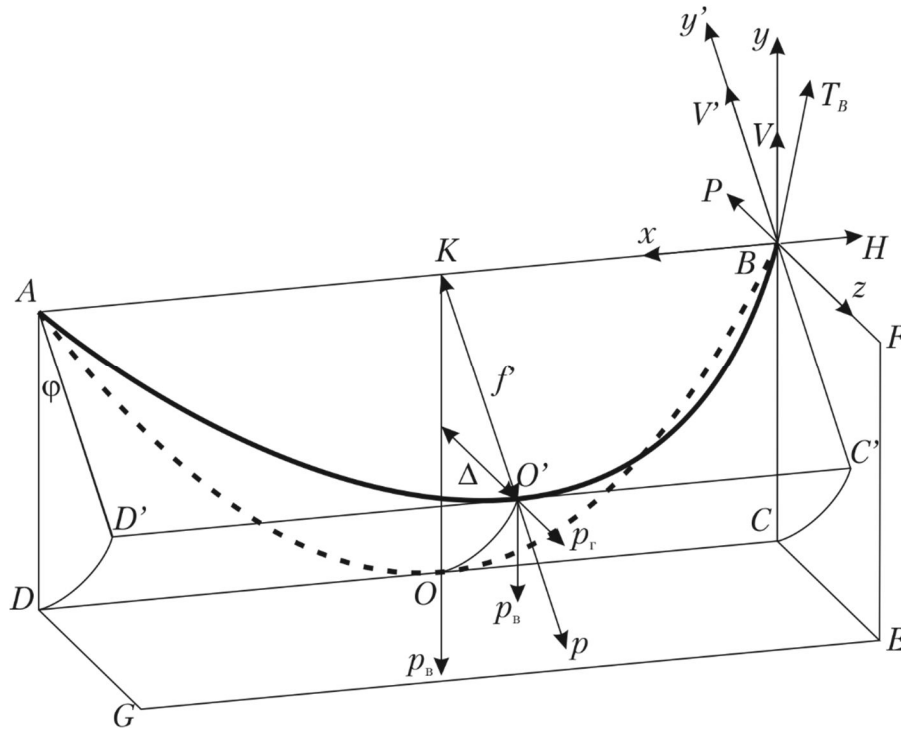


Рис. 2.21. Відхилення проводу під дією вітру за однакої висоти точок закріплення

Таким чином, для моделювання положення у просторі відхиленого під натиском вітру проводу зручно використовувати плоску прямокутну систему координат, розташовану на нахиленій площині $ABC'D'$. На рис. 2.21 така система координат позначена осями x та y' .

Нижня точка провисання проводу залишається в середині прогону, я і у разі відсутності дії вітру. Горизонтальне відхилення будь-якої точки проводу від вертикальної площини визначається виразом

$$\Delta_x = f'_x \sin \varphi,$$

де f'_x – стріла провисання в точці x проводу в нахиленій площині $ABC'D'$.

Горизонтальне відхилення нижньої точки провисання

$$\Delta = f' \sin \varphi.$$

Тяжіння в будь-якій точці проводу містить три складові – вертикальну, горизонтальну поздовжню вздовж прогону та горизонтальну поперечну вздовж лінії дії вітру.

Горизонтальна поздовжня складова тяжіння у будь-якій точці проводу є сталою величиною і дорівнює тяжінню в нижній точці провисання проводу.

Нахилена складова тяжіння в площині кривої провисання проводу

$$V' = px,$$

де x – горизонтальна відстань від нижньої точки провисання проводу.

Розкладання нахиленої складової тяжіння на вертикальну та горизонтальну поперечну складові дає такий результат:

$$\begin{cases} V = V' \cos \varphi = px \cos \varphi = p_v x; \\ P = V' \sin \varphi = px \sin \varphi = p_r x. \end{cases} \quad (2.65)$$

Аналіз виразів (2.65) свідчить про те, що вертикальна складова тяжіння визначається лише навантаженням від власної ваги проводу та не залежить від навантаження від натиску вітру. Своєю чергою, горизонтальна поперечна складова тяжіння визначається тільки навантаженням від натиску вітру та не залежить від вертикального навантаження від ваги проводу.

В точках закріплення проводу, наприклад, в точці B на рис. 2.21 складові тяжіння визначають за виразами

$$H_B = H; \quad V_B = p_v \frac{l}{2}; \quad P_B = p_r \frac{l}{2}.$$

Зазначимо, що наявність навантаження від ваги відкладень ожеледі не змінює картину провисання проводу, а лише збільшує вертикальну складову тяжіння проводу.

Розглянемо далі відхилення кривої провисання проводу під дією натиску вітру у разі, коли точки закріплення проводу розташовані на різних висотах над землею, як показано на рис. 2.22, де використано наступні позначення: Δh – перепад висот закріплення проводу; θ – кут нахилу прямої, що поєднує точки закріплення проводу, до горизонталі; φ – кут розвороту площини кривої провисання проводу.

За відсутності вітрового навантаження крива провисання проводу належить вертикальній площині $ADBC$ та показана на рис. 2.22 пунктирною лінією AOB . Оскільки площини $ADBC$ та $ACEG$ є взаємно перпендикулярними, трикутник ABC є прямокутним з гіпотенузою AB .

Під дією натиску вітру провід відхиляється від вертикальної площини та займає положення $AO'B$, представлене на рис. 2.22 суцільною лінією у площині дії сумарного навантаження $AD'BC'$. Очевидно, нову площину провисання проводу $AD'BC'$ можна отримати шляхом повороту вертикальної площини $ADBC$ навколо нахиленої вісі AB на кут, величина якого визначається співвідношенням між горизонтальним та вертикальним навантаженнями, які зазнає провід. Нахил вісі AB визначається різницею висот закріплення проводу. Взаємна перпендикулярність площин $ADBC$ та $BCEF$ визначає прямокутний трикутник ACC' з гіпотенузою CC' .

У кожній точці проводу горизонтальне навантаження перпендикулярне до площини $ADBC$, а вертикальне – до площини $ACEG$. Вектори цих

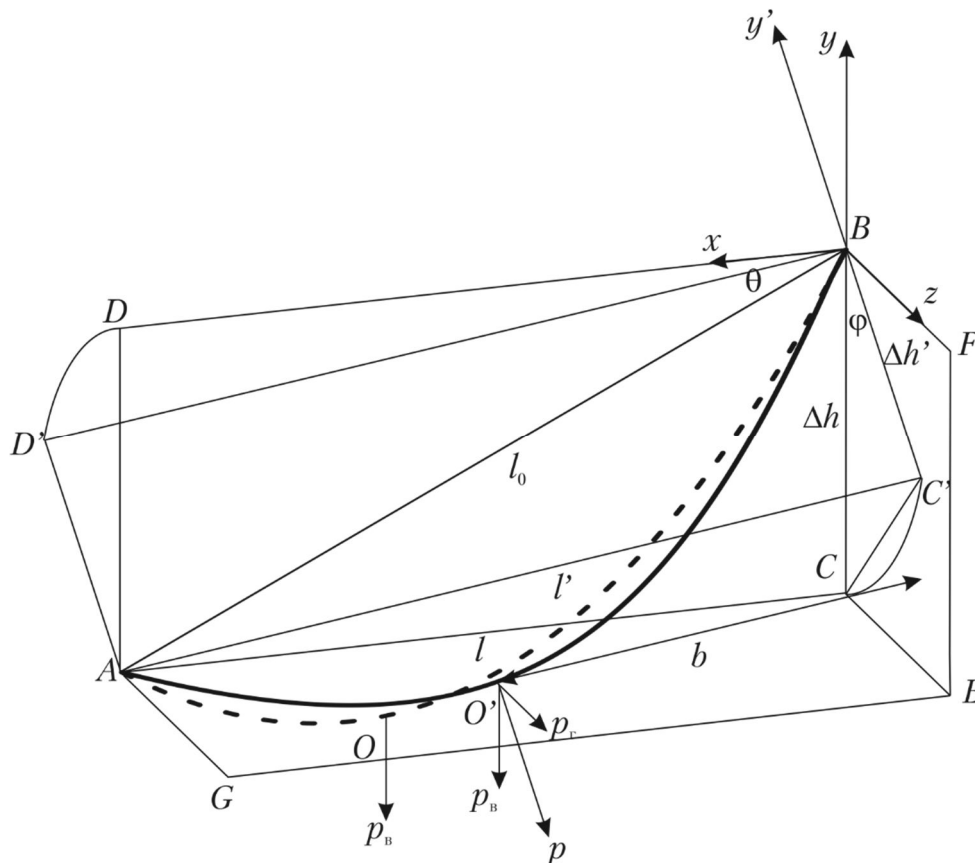


Рис. 2.22. Відхилення проводу під дією вітру за різної висоти точок закріплення

сил утворюють прямокутник з діагоналлю, яка дорівнює результуючому навантаженню. Такий прямокутник знаходиться у площині, паралельній вертикальній площині $BCEF$. Таким чином, вектор сумарного навантаження знаходиться одночасно на нахилений площині $AD'BC'$ та на вертикальній площині, паралельній площині $BCEF$. Це стосується всіх точок проводу, у тому числі – точки B . Отже, наведені міркування свідчать про те, що трикутник ABC' також є прямокутним з гіпотенузою AB .

Для проводу, що знаходиться у невідхиленому стані відрізок AC визначає довжину прогону, а відрізок BC – перепад висот точок закріплення проводу:

$$l = AC; \quad \Delta h = BC.$$

Після обертання вертикальної площини кривої провисання проводу відносно вісі AB у нахилений системі координат, пов'язаній з площиною $AD'BC'$ відрізки AC' та BC' можна розглядати як фіктивні прогін та перепад висот точок закріплення проводу:

$$l' = AC; \quad \Delta h' = BC.$$

Позначимо l_0 довжину відрізка AB між точками закріплення проводу. З прямокутних трикутників ABC та ABC' випливають співвідношення

$$\begin{aligned} l^2 &= l_0^2 - \Delta h^2; \\ l'^2 &= l_0^2 - \Delta h'^2. \end{aligned}$$

Своєю чергою прямокутний трикутник ACC' визначає

$$|CC'|^2 = l'^2 - l^2 = (l_0^2 - \Delta h'^2) - (l_0^2 - \Delta h^2) = \Delta h^2 - \Delta h'^2 \quad (2.66)$$

Отриманий вираз (2.66) свідчить про те, що трикутник BCC' також є прямокутним з гіпотенузою BC . Звідси випливають наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} \Delta h' &= \Delta h \cos \varphi; \\ l' &= \sqrt{l^2 + \Delta h^2 \sin^2 \varphi} = l \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi}. \end{aligned}$$

Таким чином, моделювання проводу у разі дії горизонтального навантаження від натиску вітру можна здійснювати за відомими співвідношеннями для вертикального розташування кривої провисання проводу з урахуванням фіктивних значень довжини прогону та перепаду висот точок закріплення проводу в системі координат, пов'язаній з нахиленою площиною кривої провисання проводу.

Тяжіння в точках закріплення проводу у цьому разі визначають за виразами

$$\begin{cases} H_A = H_B = H; \\ P_A = P_B = p_{\Gamma} \frac{l'}{2}; \\ V_A = p_{\text{в}} a; \quad V_B = p_{\text{в}} b, \end{cases} \quad (2.67)$$

де H_0 – тяжіння в точці з найбільшою кривизною (умовній найнижчій точці на відхилений площині); a, b – горизонтальні відстані між умовною найнижчою точкою та вертикальними площинами, які обмежують прогін.

Аналіз виразів (2.67) свідчить про те, що горизонтальна поздовжня складова навантаження є однаковою у всіх точках прогону; горизонтальна поперечна складова тяжіння обумовлена лише навантаженням від натиску вітру і рівномірно розподіляється між точками закріплення проводу; вертикальна складова тяжіння обумовлена тільки навантаженням від власної ваги проводу та визначається вагою відрізка проводу між точкою закріплення та умовною нижчою точкою кривої провисання проводу.

Зазначимо, що представлений спосіб розрахунку стану проводу у разі дії горизонтального поперечного навантаження від натиску вітру пов'язаний з певною похибкою моделювання. Справа в тому, що кут повороту

площини кривої провисання проводу відповідно до виразу (2.64) визначається співвідношенням між горизонтальним та вертикальним навантаженнями. При чому вважається, що напрям вітру є перпендикулярним до прогону, тобто до площини кривої провисання проводу у невідхиленому стані. Розворот цієї площини відносно вісі AB за неоднакової висоти точок закріплення проводу визначає зменшення кута атаки вітру та обумовлює зменшення навантаження від натиску вітру

$$p'_r = p_r \cos \psi,$$

де ψ – кут між напрямом вітру та перпендикуляром до проводу у відхиленому стані.

Таким чином розворот площини кривої провисання проводу слід визначати за уточненим виразом

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{p_r \cos \psi}{p_v} = \operatorname{tg} \varphi \cos \psi. \quad (2.68)$$

Очевидно, що кут між напрямом вітру та перпендикуляром до проводу у відхиленому стані дорівнює горизонтальній проекції кута між вертикальною площиною кривої провисання проводу у невідхиленому стані на площиною провисання проводу під натиском вітру, як показано на рис. 2.23. Для визначення такого кута з точки C' опустимо перпендикуляр на лінію BC до точки M та проведемо лінію AM . Кут між прямими AC та AM , очевидно дорівнює куту між напрямом вітру та перпендикуляром до проводу.

Введемо позначення

$$l'' = AN.$$

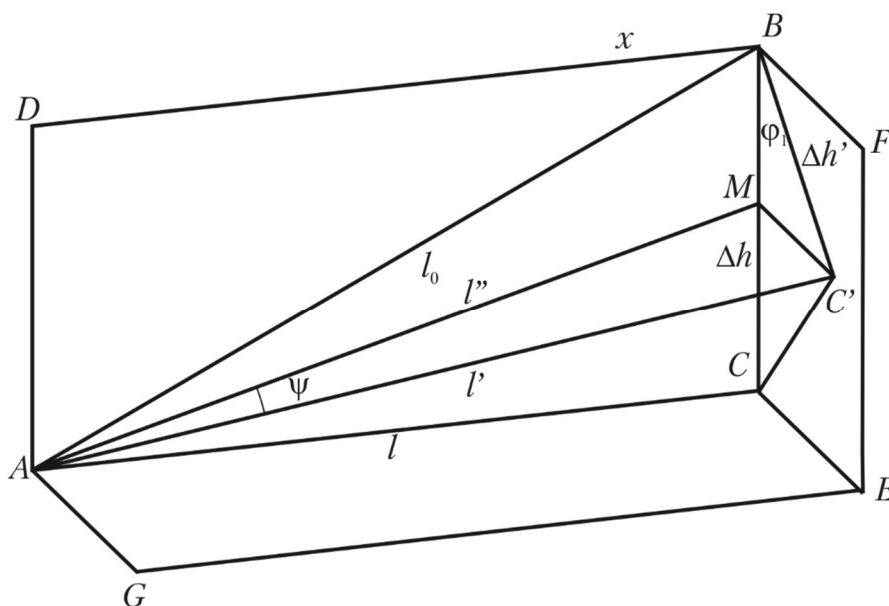


Рис. 2.23. Визначення кута відхилення площини провисання проводу

Для прямокутного трикутника $BC'M$ справедливо співвідношення

$$C'M = \Delta h' \sin \varphi_1 = \Delta h \sin \varphi_1 \cos \varphi_1;$$

$$BM = \Delta h' \cos \varphi_1 = \Delta h \cos^2 \varphi_1;$$

$$CM = \Delta h - BM = \Delta h \sin^2 \varphi_1.$$

Своєю чергою з прямокутних трикутників AMC та AMC' отримуємо

$$l'' = \sqrt{l^2 + CM^2} = \sqrt{l^2 + \Delta h^2 \sin^4 \varphi_1} = l \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^4 \varphi_1};$$

$$\cos \psi = \frac{l''}{l'} = \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^4 \varphi_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi_1}}. \quad (2.69)$$

Вирази (2.68) та (2.69) дозволяють організувати графоаналітичне визначення кута розвороту площини кривої провисання проводу під натиском вітру, представлене на рис. 2.24. Дійсно, кожний з цих виразів можна інтерпретувати як функціональну залежність $\cos \psi(\varphi_1)$:

$$f_1(\varphi_1) = \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi}; \quad f_2(\varphi_2) = \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^4 \varphi_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi_1}}.$$

Абсциса точки перетину графіків таких залежностей визначає шуканий кут розвороту площини.

Для аналітичного визначення кута розвороту площини провисання проводу підставимо у формулу (2.68) вираз (2.69) та піднесемо отриманий вираз у квадрат:

$$\operatorname{tg}^2 \varphi_1 = \frac{\sin^2 \varphi_1}{1 - \sin^2 \varphi_1} = \tan^2 \varphi \cdot \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^4 \varphi_1}{1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi_1}.$$

Сформуємо рівняння відносно $\sin^2 \varphi_1$

$$\sin^2 \varphi_1 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \varphi_1) = (1 - \sin^2 \varphi_1) (1 + \operatorname{tg}^2 \theta \sin^4 \varphi_1) \operatorname{tg}^2 \varphi,$$

або

$$X^3 \operatorname{tg} \varphi + X^2 (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi) + X \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \theta} = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{\operatorname{tg}^2 \theta} \quad (2.70)$$

де $X = \sin^2 \varphi_1$.

Серед всіх коренів рівняння (2.70) фізичний зміст має дійсний додатний корінь, який визначає кут розвороту площини кривої провисання проводу під натиском вітру

$$\varphi_1 = \arcsin(\sqrt{x}),$$

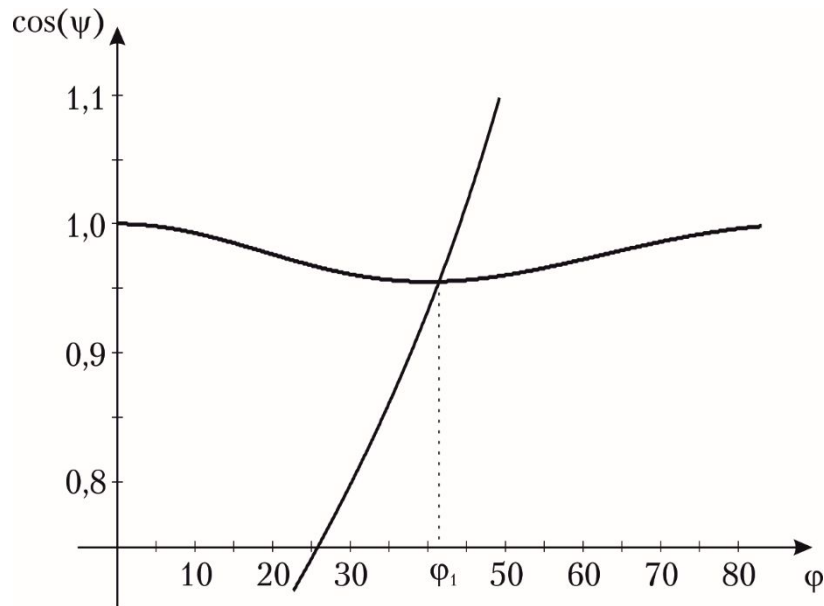


Рис. 2.24. Графоаналітичне визначення кута відхилення площини провисання проводу

де x – дійсний додатний корінь рівняння (2.70).

Розрахункові експерименти показують, що зміна кута нахилу прямої, що з'єднує точки закріплення проводу на опорах від 0 до 45° обумовлює зміну кута між напрямом вітру та перпендикуляром до проводу в межах від 0 до $13\text{--}14^\circ$, що визначає зменшення вітрового навантаження не більше, чим на 8% . Слід зазначити, що в більшості практичних випадків кут нахилу прямої, що поєднує точки закріплення проводу не перевищує 25° , що визначає зневажливо мале зменшення вітрового навантаження на відхилений провід, яким нехтують без втрати точності моделювання.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Які складові містить тяжіння в проводі, який зазнає натиск вітру?
2. Чому для моделювання відхиленого під натиском вітру проводу зручно використовувати плоску систему координат?
3. Як визначають відхилення проводу, точки закріплення якого розташовано на різних висотах?
4. Поясніть зменшення вітрового навантаження на відхилений провід. За яких умов таким зменшенням можна знехтувати?



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 98-105

МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

3.1. ПРИНЦИПИ МЕХАНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній враховують постійні, змінні та аварійні навантаження та впливи [14, 21, 47, 66].

До постійних навантажень відносять навантаження, обумовлені власною вагою будівельних конструкцій, проводів, тросів та устаткування повітряних ліній; натягом проводів та тросів за середньорічної температури і відсутності вітру та ожеледі; вагою та тиском ґрунтів, тиском води на фундаменти в руслах рік, а також попереднім напруженням конструкцій.

До змінних відносять навантаження, обумовлені натиском вітру на проводи, троси та конструктивні елементи опор, вагою відкладень ожеледі та проводах і тросах; додатковим натягом проводів понад їх значення за середньорічної температури; тиском води на опори та фундаменти в заплавах рік; тиском льоду; навантаження, які виникають під час виготовлення, перевезення та монтажу конструкцій, проводів та тросів.

За тривалістю змінні навантаження поділяють на тривалі, короткочасні та епізодичні. До короткочасних навантажень відносять, наприклад, навантаження за екстремальних кліматичних умов (максимальний натиск вітру, максимальна ожеледь, мінімальна температура). До епізодичних відносять сейсмічні навантаження. Решту навантажень розглядають як тривалі.

До аварійних відносять навантаження, обумовлені обривом проводів та тросів лінії.

Часто, як окремий вид навантажень, розглядають кліматичні навантаження, обумовлені зміною кліматичних умов в районі траси лінії. Очевидно, кліматичні навантаження характеризуються випадковими величинами, прояв яких має ймовірнісний характер і можуть відбуватися у будь-який час протягом розрахункового періоду експлуатації лінії. Природно, що в розрахунках механічних навантажень необхідно враховувати найбільш екстремальні умови, які можуть спостерігатися в районі проходження траси лінії.

Відповідно до чинних нормативів механічних розрахунків повітряних ліній електропередавання визначають граничні та експлуатаційні кліматичні навантаження.

Граничне розрахункове навантаження відповідає екстремальній ситуації, що може виникнути в середньому не більше одного разу протягом періоду експлуатації повітряної лінії. Перевищення граничного розрахункового навантаження обумовлює повну втрату працездатності конструкцій.

Експлуатаційне розрахункове навантаження – кліматичне навантаження, що характеризує умови нормальної експлуатації конструкції повітряної лінії. Перевищення експлуатаційного розрахункового навантаження обумовлює часткову втрату працездатності конструкцій, наприклад, виникнення неприпустимих габаритів струмопровідних проводів, неприпустимих переміщень конструкцій, розкриття тріщин тощо.

Критерієм вибору кліматичних навантажень та впливів на конструктивні елементи повітряних ліній є певна ймовірність неперевикнення навантажень протягом всього періоду експлуатації ліній своїх граничних значень. Таке неперевикнення граничних навантажень розглядають як безвідмовність конструкції лінії [3]. Чинні нормативні документи встановлюють чотири класи безвідмовності повітряних ліній відповідно до рівня відповідальності ліній в енергосистемі [47]. Класи безвідмовності визначають такі характеристики повітряних ліній електропередавання:

- номінальну напругу;
- розрахунковий період експлуатації лінії;
- безвідмовність повітряної лінії протягом періоду експлуатації;
- середні періоди повторюваності граничних та експлуатаційних кліматичних навантажень та впливів.

Характеристики класів безвідмовності повітряних ліній наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Характеристики класів безвідмовності повітряних ліній

| Клас безвідмовності | Номінальна напруга, кВ | Розрах. період експлуатації, років | Ймовірність безвідмовної роботи | | Середній період повторюваності, років | |
|---------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| | | | Протягом 1 року | Протягом періоду експлуатації | Граничних навантажень | Експл. навантажень |
| 1 КБ | До 1 | 30 | 0,967 | 0,36 | 30 | 5 |
| 2 КБ | 1–35 | 50 | 0,980 | 0,36 | 50 | 10 |
| 3 КБ | 110–330 | 50 | 0,993 | 0,72 | 150 | 15 |
| 4 КБ | 500–750 | 50 | 0,998 | 0,90 | 500 | 25 |

Кліматичні умови для розрахунків конструктивних елементів повітряних ліній визначають за їх характеристичними значеннями, що відповідають середнім значенням кліматичних навантажень та впливів за середнього періоду повторюваності 50 років.

Таку інформацію містять, наприклад, мапи кліматичного районування території України, представлені в Додатку Б. Так, за максимальною температурою територію України поділяють на три райони з характеристичними значеннями $+36^{\circ}\text{C}$, $+38^{\circ}\text{C}$ та $+40^{\circ}\text{C}$ відповідно (див. рис. А2). За мінімальною температурою виділяють дев'ять районів з характеристичними значеннями температури в межах $-24^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$ із кроком 2°C (див. рис. А3). За середньорічною температурою, своєю чергою, виділяють сім районів з характеристичними значеннями температури в межах $+6^{\circ}\text{C} \dots +12^{\circ}\text{C}$ із кроком 2°C (див. рис. А4). На рис. А5 наведено мапу кліматичного районування території України за характеристичними значеннями навантажень від ваги відкладень ожеледі на проводах повітряних ліній. Така мапа визначає поділ території України на шість районів з характеристичними значеннями навантажень 8, 12, 15, 20, 30 та 40 Н/м відповідно. За вітровим навантаженням, територію України поділяють на п'ять районів з характеристичними значеннями в межах $400 \dots 600 \text{ Па}$ із кроком 50 Па (див. рис. А6). За вітровим навантаженням під час ожеледі виділяють шість районів з характеристичними значеннями вітрового натиску в межах $150 \dots 400 \text{ Па}$ з кроком 50 Па (див. рис. А7).

Для повітряних ліній вищих класів номінальної напруги, які характеризуються істотними довжинами та до конструкцій яких висуюають підвищені вимоги щодо надійності, характеристичні значення кліматичних навантажень та впливів встановлюють за даними регіональних мап кліматичного районування на підставі аналізу багаторічних спостережень гідрометеорологічних станцій. На рис. А9–А11 наведені, наприклад, регіональні мапи кліматичного районування території Київської області за характеристичними значеннями навантажень від ваги ожеледі, натиску вітру та дії вітру на проводи, вкриті ожеледдю відповідно.

Кліматичні навантаження за будь-якого розрахункового періоду повторюваності визначають шляхом множення характеристичних значень на відповідні коефіцієнти надійності. В табл. 3.2, наприклад, наведено значення коефіцієнтів надійності для розрахунку проводів та тросів повітряних ліній за розрахункових періодів повторюваності відповідних класів безвідмовності.

Таблиця 3.2. Коефіцієнти надійності кліматичних навантажень за розрахункових періодів повторюваності

| Вид навантаження | Клас безвідмовності лінії | | | |
|---|---------------------------|------|------|------|
| | 1 КБ | 2 КБ | 3 КБ | 4 КБ |
| Від ваги ожеледі | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,85 |
| Від максимального вітрового натиску | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,87 |
| Від дії вітру на провід, вкритий ожеледдю | 0,47 | 0,63 | 0,72 | 0,84 |

Однією з основних вимог до конструктивного виконання повітряних ліній є забезпечення механічної міцності конструкцій, що визначає необхідність здійснення механічних розрахунків. В задачах проектування та аналізу механічної частини повітряних ліній електропередавання застосовують три основні методи механічних розрахунків [7, 31, 34]:

- 1) метод допустимих напружень;
- 2) метод руйнівних навантажень;
- 3) метод граничних станів.

Метод допустимих напружень гарантує роботоздатність конструкції повітряної лінії за будь-яких можливих кліматичних навантажень та впливів протягом періоду експлуатації. За цим методом проводять розрахунки проводів та тросів повітряних ліній, який Суть методу полягає в тому, що механічна міцність проводів та тросів забезпечується нормативним значенням допустимого напруження, обумовленим з певним запасом межею міцності за розтягування (тимчасовим опором руйнуванню) проводу (тросу). Таким чином, необхідно забезпечити таку конструкцію лінії, щоб за будь-яких можливих кліматичних умов в районі траси лінії напруження у матеріалі проводу не перевищило свого допустимого значення відповідно до виразу

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{k},$$

де σ_{\max} – найбільше напруження, яке може виникати в нижній точці провисання проводу під час експлуатації лінії; $\sigma_{\text{доп}}$ – нормативне допустиме напруження проводу (тросу); $\sigma_{\text{в}}$ – межа міцності проводу (тросу) під час розтягування (тимчасовий опір руйнуванню); k – коефіцієнт запасу міцності [7].

Для визначення запасу міцності проводів та тросів слід зважати на такі обставини:

- 1) характеристичні значення кліматичних навантажень та впливів визначають з певною достовірністю на підставі статистичної обробки даних багаторічних спостережень на метеорологічних станціях в районі траси повітряної лінії;
- 2) в багатопроволочних проводах та тросах виникають додаткові напруження, обумовлені пружними деформаціями під час скручування проволок, крім того слід враховувати нерівномірний розподіл тягіння між окремими повивами проволок;
- 3) механічний розрахунок проводів та тросів виконують за найменшим тягінням в нижній точці провисання, також слід враховувати напруження вигину проводів та тросів в місцях їх закріплення.

Напруження, які виникають в проводі за екстремальних умов, наприклад, в режимах мінімальних температур або максимального вітру не мають перевищувати певного гранично допустимого значення. Це означає,

що в будь-якому іншому можливому режимі експлуатації лінії механічні напруження гарантовано не перевищать своїх гранично допустимих значень.

Слід зазначити, що чинні нормативи визначають допустимі напруження для режимів мінімальних температур, максимальних навантажень та для експлуатаційного режиму. Для режимів мінімальних температур та максимальних навантажень встановлено однакові допустимі механічні напруження. Допустимі напруження в експлуатаційному режимі, природно, менша за гранично допустимі напруження в екстремальних режимах. Це пояснюється тим, що екстремальні кліматичні режими (мінімальних температур та максимальних навантажень) є короткочасними на відміну від довготривалого експлуатаційного режиму. Очевидно, що коефіцієнт запасу міцності для експлуатаційного режиму має бути більшим, чим для екстремальних короткочасних режимів, а отже, гранично допустиме напруження в експлуатаційному режимі менше, чим в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень. Таким чином, для алюмінієвих проводів встановлено 55-65% запас міцності (коефіцієнт запасу міцності в межах 2,22–2,85) в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень відповідно до площі поперечного перерізу проводу. Для сталевих проводів запас міцності в даних режимах встановлено в межах 50-60% (коефіцієнт запасу міцності в межах 2,0–2,5) відповідно до площі поперечного перерізу проводу та співвідношення між перерізами сталевих та алюмінієвих проводів. В експлуатаційному режимі для всіх типів сталевих та алюмінієвих проводів встановлено 70%-й запас міцності (коефіцієнт запасу міцності 3,33).

Розрахунок за *методом руйнівних навантажень* полягає у визначенні граничного навантаження, яке може витримати конструкція не руйнуючись та не змінюючи незворотно своєї форми. Граничне навантаження зіставляють із робочим та роблять висновок про ступінь міцності конструкції в робочих умовах. Механічну міцність конструкції забезпечують за допомогою коефіцієнтів запасу відповідно до виразу

$$P \leq \frac{R}{k},$$

де P – робоче навантаження на елемент повітряної лінії; R – гарантоване руйнівне навантаження, тобто найменше навантаження, за якого конструкції руйнуються або незворотно змінюють свою форму; k – коефіцієнт запасу міцності.

Метод руйнівних навантажень використовують для розрахунку ізоляторів та лінійної арматури повітряних ліній. Чинні нормативні документи, зокрема ПУЕ визначають такі коефіцієнти запасу:

1) в нормальних режимах

➤ за максимальних навантажень

2,5

- за середньорічної температури без ожеледі та вітру – 5,0;
- 2) в аварійних режимах
 - для повітряних ліній до 330 кВ – 1,8;
 - для повітряних ліній 400 кВ і вище – 2,0.

Метод граничних станів передбачає встановлення системи розрахункових коефіцієнтів, які враховують особливості роботи конструкції, забезпечують її надійність та гарантують ненастання граничних станів, за яких конструкція перестає задовольняти заданим експлуатаційним вимогам. За методом граничних станів проводять розрахунки опор та фундаментів повітряних ліній електропередавання. Тут розглядають дві групи граничних станів.

До першої групи відносять граничні стани, які призводять до втрати несучої здатності та (або) до повної непридатності до експлуатації конструкцій. Тут до першої групи відносять стани за мінімальної температури або максимальних навантажень, коли спостерігаються найбільші тяжіння в проводах і тросах, що призводить до найбільших вигинаючих або крутних моментів на опорах, найбільших розтягуючих або стискаючих зусиль в елементах опор та фундаментів. До першої групи відносять також стани за середньоексплуатаційних навантажень за яких можуть настати втомні руйнації проводів, тросів та ізоляторів. За першою групою граничних станів проводять розрахунки несучої здатності опор та фундаментів повітряних ліній.

До другої групи граничних станів відносять стани, які ускладнюють нормальну експлуатацію конструкцій. Тут розглядають стани, за яких виникають неприпустимі деформації, зсуви або відхилення елементів, що порушує нормальну експлуатацію конструкцій повітряних ліній. До цієї групи відносять стани за найбільших стріл провисання проводів та тросів, найбільших вигинах опор, наближеннях струмоведучих проводів до заземлених елементів опор тощо. За другою групою граничних станів проводять розрахунки пересувань опор та фундаментів, а також тріщиностійкості залізобетонних конструкцій.

Мета розрахунків полягає у недопущенні з певною забезпеченістю граничних станів першої та другої групи під час експлуатації повітряної лінії, а також граничних станів першої групи під час монтажних робіт зі спорудження лінії електропередавання. Аналітично це можна записати у наступному вигляді. Для першої групи:

$$P \leq \Phi,$$

де P – зусилля в конструкціях за найгіршого сполучення впливів розрахункових навантажень; Φ – несуча здатність конструкцій.

Для другої групи граничних станів умова має вигляд

$$\sum P_i \delta_i \leq \delta_{\text{гр}},$$

де δ_i – деформація або зсув внаслідок впливу одиничних навантажень; P_i – дійсні нормативні навантаження; $\delta_{\text{гр}}$ – гранично допустима деформація.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Наведіть та поясніть класифікацію навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній.
2. Поясніть поділення повітряних ліній електропередавання за класами безвідмовності.
3. Наведіть визначення та охарактеризуйте типи експлуатаційних режимів повітряних ліній.
4. Охарактеризуйте розрахункові сполучення навантажень на конструктивні елементи ліній.
5. Поясніть сутність методу допустимих напружень.
6. Які елементи повітряної лінії розраховують за методом допустимих напружень?
7. У чому полягає особливість застосування методу допустимих напружень для розрахунку проводів та тросів повітряних ліній?
8. Поясніть сутність методу руйнівних навантажень.
9. Які елементи повітряної лінії розраховують за методом руйнівних навантажень?
10. Поясніть сутність методу граничних станів.
11. Які елементи повітряної лінії розраховують за методом граничних станів?
12. Які стани відносять до першої групи граничних станів?
13. Які стани відносять до другої групи граничних станів?

3.2. МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ТА ТРОСИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Навантаження на конструктивні елементи повітряних ліній, зокрема на проводи та троси, обумовлені постійними і тривалими навантаженнями (наприклад, від власної ваги конструкцій) та змінними короткочасними кліматичними навантаженнями (від натиску вітру та ваги відкладень ожеледі). За напрямом дії навантаження на проводи та троси поділяють на вертикальні та горизонтальні. До вертикальних відносять навантаження від власної ваги проводів та тросів, а також навантаження від ваги ожеледі на проводах та тросах повітряної лінії. До горизонтальних відносять вітрові навантаження на голі та покриті ожеледдю проводи та троси [7].

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній вважають, що навантаження на проводи та троси рівномірно розподілені вздовж довжини проводу (тросу) та є статичними [6, 14, 21, 29, 47]. Визначають наступні сім типів механічних навантажень на проводи та троси повітряних ліній.

1. Навантаження від власної ваги проводу (тросу).

Навантаження від власної ваги обумовлене матеріалом та конструкцією проводу (тросу). Таке навантаження є постійним та вертикальним. Одиничне навантаження від власної ваги проводу (тросу) (див. рис. 3.1) визначають за чинними стандартами або відповідними технічними умовами на кабельно-провідникову продукцію

$$p_1 = g \cdot M_0 \cdot 10^{-3}, \quad (3.1)$$

де g – прискорення вільного падіння; M_0 – маса 1 км проводу, кг.

Відповідне значення питомого навантаження визначають за виразом

$$\gamma_1 = \frac{g \cdot G_0 \cdot 10^{-3}}{F}. \quad (3.2)$$

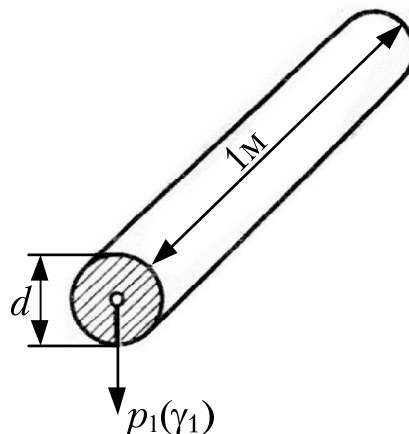


Рис. 3.1. Навантаження від власної ваги проводу

2. Навантаження від ваги відкладень ожеледі.

Навантаження від ваги відкладень ожеледі на проводах та тросах повітряної лінії є змінним кліматичним вертикальним навантаженням.

Відкладення ожеледі на проводах і тросах повітряних ліній являють собою неоднорідну структуру неправильної форми, яка визначається налипанням мокрого снігу, памороззю та відкладенням льоду. Однак, у розрахунках механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній умовно вважають, що відкладення ожеледі на проводах і тросах має форму ідеального полого циліндру однорідної структури із густиною 900 кг/м^3 , як показано на рис. 3.2, де d – внутрішній діаметр полого циліндру (діаметр проводу або тросу); b – товщина стінки циліндру (товщина стінки ожеледі).

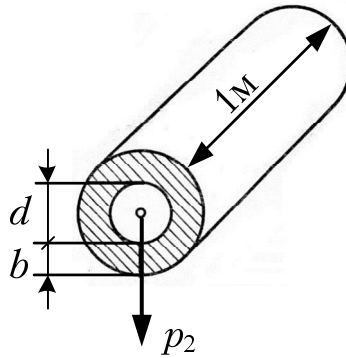


Рис. 3.2. Навантаження від ваги ожеледі

Для розрахунку одиничного механічного навантаження від ваги відкладень ожеледі необхідно визначити об'єм полого циліндру:

$$V = \frac{\pi}{4} \left[(d + 2b)^2 - d^2 \right] 10^{-6} = \pi b (d + b) 10^{-6}. \quad (3.3)$$

У виразі (3.3) діаметр проводу та товщина стінки ожеледі вимірюється у міліметрах, а об'єм – у кубічних метрах.

Одиничне навантаження визначають за виразом

$$p_2 = g\rho V = 0,9g\pi b (d + b) 10^{-3}, \quad (3.4)$$

де $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³ – густина ожеледі.

Для визначення механічного навантаження від ваги ожеледі за виразом (3.4) необхідно використовувати дані мап територіального районування України за характеристичними значеннями ожеледних навантажень, або за даними спостережень на метеорологічних станціях в районі траси повітряної лінії. За ожеледним навантаженням виділяють шість районів, характеристичні значення кліматичних навантажень яких наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Характеристичні значення ожеледних навантажень

| Район | Вага ожеледі, Н/м | Стінка ожеледі, мм |
|-------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 8 | 12 |
| 2 | 12 | 16 |
| 3 | 15 | 19 |
| 4 | 20 | 22 |
| 5 | 30 | 28 |
| 6 | 40 | 33 |

Слід зважати на те, що характеристичні значення кліматичних навантажень, зокрема товщину стінки ожеледі визначають за середнього періоду повторюваності 50 років. Водночас, відповідно до характеристик класів безвідмовності повітряних ліній середні періоди повторюваності складають 5, 10, 15 та 25 років (див. табл. 3.1). Це визначає необхідність перерахунку характеристичних значень кліматичних навантажень, зокрема навантажень від ваги відкладень ожеледі на проводах і тросах до середніх періодів повторюваності відповідно до класу безвідмовності конкретної лінії електропередавання за допомогою коефіцієнтів надійності за кліматичними навантаженнями, наведеними в табл. 3.2 та 3.4.

Таблиця 3.4. Коефіцієнт надійності за вагою ожеледі

| | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|
| Період повторюваності, років | 5 | 10 | 15 | 25 | 30 | 50 | 150 | 500 |
| Коефіцієнт надійності за вагою ожеледі | 0,4 | 0,6 | 0,7 | 0,85 | 0,85 | 1,0 | 1,25 | 1,53 |

Під час визначення навантажень від ваги ожеледі на проводах і тросах повітряної лінії також слід зважати на те, що характеристичні значення ожеледних навантажень визначають на металевому стрижні діаметром 10 мм на висоті 10 м над поверхнею землі. Разом з цим відомо, що товщина стінки ожеледі змінюється відповідно до висоти розміщення проводу над поверхнею землі та діаметру проводу. Так, збільшення висоти розташування проводу над поверхнею землі призводить до збільшення товщини стінки ожеледі. Збільшення діаметру проводу обумовлює зменшення товщини стінки ожеледі. Табл. 3.5 містить дані щодо поправкових коефіцієнтів на товщину стінки ожеледі відповідно до висоти підвішування та діаметру проводів лінії.

Таблиця 3.5. Поправкові коефіцієнти навантаження від ожеледі

| Висота розташування проводу, м | Поправковий коефіцієнт за висотою | Діаметр проводу або троса, мм | Поправковий коефіцієнт за діаметром проводу |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|
| 5 | 0,8 | до 5 | 1,1 |
| 10 | 1,0 | 5 | 1,1 |
| 20 | 1,2 | 10 | 1,0 |
| 30 | 1,4 | 20 | 0,9 |
| 50 | 1,6 | 30 | 0,8 |
| 70 | 1,8 | 50 | 0,7 |
| 100 | 2,0 | 70 | 0,6 |

Навантаження від ваги відкладень ожеледі на проводи повітряної лінії обчислюють за висотою розташування зведеного центру мас всіх проводів, закріплених у прогоні, відповідно до міркувань, наведених в підрозділі 2.6.

Таким чином, вираз (3.4) для визначення одиничних навантажень від ваги відкладень ожеледі набуває вигляду

$$p_2 = 0,9g\gamma_{fm}\pi k_h\mu b(d + k_h\mu b)10^{-3}, \quad (3.5)$$

де γ_{fm} – коефіцієнт надійності за вагою ожеледі відповідно до середнього періоду повторюваності (див. табл. 3.2 або 3.4); k_h, μ – поправкові коефіцієнти, які враховують зміну товщини стінки ожеледі відповідно до висоти розташування зведеного центру ваги проводів у прогоні та діаметру проводу або тросу відповідно (див. табл. 3.5).

Навантаження від ваги ожеледі можна визначити також в інший спосіб за характеристичним значенням навантаження від ваги ожеледі відповідно до територіального районування України за характеристичними значеннями навантаження від ваги відкладень ожеледі:

$$p_2 = \gamma_{fm}k_{h1}\mu_1g_p,$$

де g_p – характеристичне значення максимального навантаження від ваги ожеледі на провід діаметром 10 мм для рівнинної місцевості на висоті 10 м над поверхнею землі; k_{h1} – коефіцієнт, який враховує зміну навантаження ожеледі за висотою розташування зведеного центру мас проводів в прогоні (див. табл. 3.6); μ_1 – коефіцієнт, який враховує зміну навантаження ожеледі відповідно до діаметру проводів і тросів повітряної лінії і до значення розрахункового навантаження від ваги відкладень ожеледі (див. табл. 3.7).

Механічні навантаження від ваги ожеледі не несуть самостійного практичного змісту. Тому, для такого навантаження питоме значення не розраховують.

Таблиця 3.6. Коефіцієнт зміни навантаження ожеледі за висотою зведеного центра ваги проводів

| Висота розташування проводу, м | Поправковий коефіцієнт за висотою |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 5 | 0,7 |
| 10 | 1,0 |
| 20 | 1,3 |
| 30 | 1,7 |
| 50 | 2,2 |
| 70 | 2,7 |
| 100 | 3,3 |

Таблиця 3.7. Коефіцієнти зміни навантаження ожеледі відповідно до діаметру проводів і тросів

| діаметр, мм | розрахункове навантаження від ваги ожеледі | | | |
|-------------|--|-------|-------|-----------|
| | до 10 | 10-20 | 20-30 | більше 30 |
| 5 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 0,95 |
| 10 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 15 | 1,15 | 1,1 | 1,05 | 1,05 |
| 30 | 1,4 | 1,25 | 1,15 | 1,1 |
| 70 | 2,0 | 1,7 | 1,5 | 1,4 |

3. *Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю.*

Навантаження від власної ваги проводу (тросу) та ваги відкладень ожеледі діють в одному вертикальному напрямку, як показано на рис. 3.3. Тому сумарне навантаження визначається арифметичною сумою складових навантажень:

$$p_3 = p_1 + p_2; \quad \gamma_3 = \frac{p_3}{F}. \quad (3.6)$$

4. *Навантаження від натиску вітру.*

Навантаження від натиску вітру на проводи та троси повітряної лінії є змінним кліматичним горизонтальним навантаженням, умовно представленим на рис. 3.4. У загальному випадку навантаження від натиску вітру визначають за виразом

$$P = C_x \frac{1}{2} \rho v^2 S \sin \varphi, \quad (3.7)$$

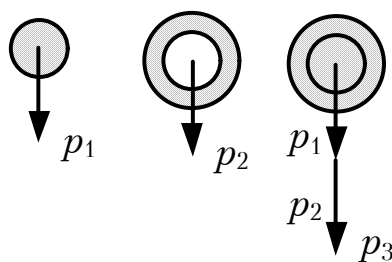


Рис. 3.3. Навантаження від ваги проводу (тросу) вкритого ожеледдю

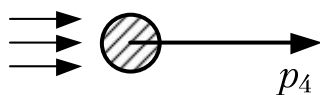


Рис. 3.4. Навантаження від натиску вітру

де C_x – коефіцієнт лобового опору (аеродинамічний коефіцієнт), який визначається густиною повітря, швидкістю вітру, формою, розмірами та шорсткістю поверхні і дорівнює 1,1 для проводів і тросів діаметром від 20 мм та 1,2 – для проводів і тросів діаметром до 20 мм, а також проводів і тросів будь-якого діаметру, вкритих ожеледдю; ρ – густина повітря; v – швидкість вітру; S – площа проекції поверхні; φ – кут між напрямом вітру та поверхнею, яка обдувається (кут атаки вітру).

Очевидно, що найбільшого значення навантаження від натиску вітру набуває за перпендикулярного напрямку вітру до поверхні, тобто за умови $\sin \varphi = 1$. Саме тому в розрахунках механічних навантажень від натиску вітру на проводи і троси повітряних ліній розглядають дію вітру, направленою під кутом 90° до траси лінії електропередавання.

Площу поверхні, яку утворює проекція відрізка проводу довжиною 1 м визначають за виразом

$$S = d \cdot 10^{-3},$$

де діаметр проводу вимірюють у міліметрах.

Складову виразу (3.7)

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = q$$

називають швидкісним натиском вітру, або характеристичним значенням вітрового натиску. За нормального барометричного тиску і температури $+15^\circ\text{C}$ густина повітря складає $1,225 \text{ кг/м}^3$. Тобто швидкісний натиск вітру дорівнює

$$q = \frac{1}{2} 1,225 v^2 = 0,6125 v^2.$$

Швидкісний натиск вітру вимірюють у паскалях. Саме цей показник нормують під час районування території України за навантаженням від дії вітру (див., наприклад, рис. 1.43). За вітровим навантаженням виділяють п'ять районів, характеристичні значення яких наведено в табл. 3.8.

Таблиця 3.8. Характеристичні значення вітрових навантажень

| Район | Швидкісний натиск вітру, Па |
|-------|-----------------------------|
| 1 | 400 |
| 2 | 450 |
| 3 | 500 |
| 4 | 550 |
| 5 | 600 |

Таким чином, базовий вираз для визначення одиничного навантаження від натиску вітру на проводи і троси повітряної лінії має вигляд

$$p_4 = C_x q d \cdot 10^{-3}. \quad (3.8)$$

Під час визначення вітрових навантажень на проводи та троси слід зважати на те, що характеристичні значення вітрового навантаження визначено за середнього періоду повторюваності 50 років на рівнинній місцевості на висоті 10 м над поверхнею землі. Це визначає необхідність застосування поправкових коефіцієнтів, які мають враховувати фактичні умови експлуатації конкретної повітряної лінії, зокрема клас безперебійності лінії, нерівномірність поривів вітру, висоту розташування проводу над поверхнею землі тощо. Для виконання таких розрахунків визначають чотири типи місцевості, які характеризують вітрові навантаження на конструктивні елементи повітряних ліній:

- I – відкриті поверхні морів, озер, які піддаються дії вітру на ділянці, довжиною не менш 3 км і плоскі рівнини без перешкод;
- II – сільська місцевість з огорожами (парканами), невеликими спорудами, будівлями і деревами;
- III – приміські і промислові зони і лісові масиви;
- IV – міські площі, на яких не менше 15% поверхні зайнято будівлями з середньою висотою, яка перевищує 15 м.

В результаті, вираз для визначення вітрового навантаження на проводи та троси набуває вигляду

$$p_4 = \gamma_{f \max} C_x C_{dc} C_c q d \cdot 10^{-3}, \quad (3.9)$$

де $\gamma_{f \max}$ – коефіцієнт надійності за максимальним натиском вітру, який визначають відповідно до середнього періоду повторюваності кліматичних умов за даними табл. 3.2 або 3.9; C_{dc} – коефіцієнт динамічності натиску вітру, який враховує нерівномірність натиску вітру вдовж прогону та пульсаційну складову дії вітру; C_c – коефіцієнт впливу на вітрове навантаження розташування проводів та тросів повітряної лінії.

Коефіцієнт динамічності натиску вітру визначають за формулою

$$C_{dc} = q_{tu} \alpha k_l, \quad (3.10)$$

Таблиця 3.9. Коефіцієнт надійності за максимальним натиском вітру

| Період повторюваності, років | 5 | 10 | 15 | 25 | 30 | 50 | 150 | 500 |
|--|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|
| Коефіцієнт надійності за максимальним натиском вітру | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,87 | 0,9 | 1,0 | 1,25 | 1,45 |

де q_{tu} – коефіцієнт впливу пульсаційного складника, який визначається типом місцевості за даними табл. 3.10; $\alpha = 2,6 - 0,3 \ln q$, але не більший за одиницю – коефіцієнт, який враховує нерівномірність натиску вітру вздовж прогону; k_l – коефіцієнт довжини прогону (див. дані табл. 3.11).

Таблиця 3.10. Коефіцієнт впливу пульсаційного складника

| Тип місцевості | I | II | III | IV |
|---|-----|-----|-----|-----|
| Коефіцієнт впливу пульсаційного складника | 1,3 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |

Таблиця 3.11. Коефіцієнт довжини прогону

| Довжина прогону, м | Коефіцієнт довжини прогону |
|--------------------|----------------------------|
| до 50 | 1,2 |
| від 50 до 800 | $1,7 - 0,12 \ln l$ |
| більше 800 | 0,85 |

Коефіцієнт впливу на вітрове навантаження розташування проводів та тросів повітряної лінії розраховують за виразом

$$C_c = C_h C_R C_{DIR}, \quad (3.11)$$

де $C_h = \beta(0,1h)^{2\alpha}$ – коефіцієнт висоти розташування проводу, який враховує збільшення вітрового натиску із збільшенням висоти над поверхнею землі; α , β – параметри відповідно до даних табл. 3.12; C_R – коефіцієнт рельєфу, який слід враховувати за умови проходження траси лінії в гірській місцевості, на пагорбі чи схилі; C_{DIR} – коефіцієнт напрямку вітру, який враховують у разі проходження траси лінії на відкритій рівнинній місцевості з постійним напрямом вітру за умови достатнього статистичного обґрунтування. Як правило, коефіцієнти рельєфу та напрямку вітру приймають такими, що дорівнюють одиниці.

Таблиця 3.12. Параметри коефіцієнту висоти розташування проводу

| Тип місцевості | α | β |
|----------------|----------|---------|
| I | 0,1 | 1,5 |
| II | 0,15 | 1,0 |
| III | 0,2 | 0,65 |
| IV | 0,25 | 0,4 |

Механічні навантаження від натиску вітру не несуть самостійного практичного змісту. Тому, для такого навантаження питома значення не розраховують.

5. Навантаження від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю.

Навантаження від натиску вітру на проводи та троси, вкриті ожеледдю є змінними кліматичними горизонтальними навантаженнями, як показано на рис. 3.5.

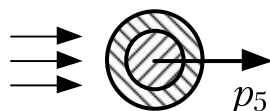


Рис. 3.5. Навантаження від тиску вітру на провід, покритий ожеледдю

Розрахунок вітрових навантажень в режимі ожеледі здійснюють аналогічно розглянутому вище розрахунку вітрових навантажень за відсутності ожеледі. Для таких розрахунків використовують вираз, аналогічний (3.9):

$$p_5 = 1,2\gamma_{fQ}C_{dc}C_cq'd \cdot 10^{-3}, \quad (3.12)$$

де γ_{fQ} – коефіцієнт надійності дії вітру на проводи та троси, вкриті ожеледдю відповідно до даних табл. 3.2 або 3.13; q' – швидкісний натиск вітру (характеристичне значення натиску вітру) в режимі ожеледі (див. табл. 3.14). У виразі (3.12) враховано, що аеродинамічний коефіцієнт для проводів, покритих ожеледдю завжди дорівнює 1,2.

Механічні навантаження від натиску вітру на проводи та троси, покриті ожеледдю не несуть самостійного практичного змісту. Тому, для такого навантаження питома значення не розраховують.

Таблиця 3.13. Коефіцієнт надійності дії вітру на елемент вкритий ожеледдю

| Період повторюваності, років | 5 | 10 | 15 | 25 | 30 | 50 | 150 | 500 |
|---|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| Коефіцієнт надійності дії вітру на елемент вкритий ожеледдю | 0,45 | 0,61 | 0,71 | 0,83 | 0,88 | 1,0 | 1,26 | 1,55 |

Таблиця 3.14. Характеристичні значення вітрових навантажень під час ожеледі

| Район | Швидкісний натиск вітру, Па | Район | Швидкісний натиск вітру, Па |
|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|
| 1 | 150 | 4 | 300 |
| 2 | 200 | 5 | 350 |
| 3 | 250 | 6 | 400 |

6. Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу) та натиску вітру.

Для визначення результуючих (сумарних) навантажень на проводи необхідно знайти геометричну суму всіх діючих на нього вертикальних і горизонтальних навантажень (див. рис. 3.6).

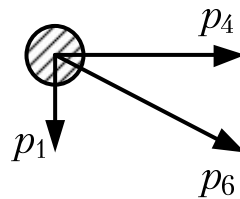


Рис. 3.6. Сумарне навантаження від власної ваги тиску вітру на провід

Сумарне одиничне навантаження на проводи (троси) від власної ваги та натиску вітру дорівнює

$$p_6 = \sqrt{p_1^2 + p_4^2}. \quad (3.13)$$

Відповідне питоме навантаження визначають за виразом

$$\gamma_6 = \frac{p_6}{F}.$$

7. Сумарне навантаження від ваги проводу (тросу), покритого ожеледдю, і натиску вітру.

Відповідно до чинних нормативів умовно вважають, що в режимі вітру під час ожеледі навантаження від ваги ожеледі складає 90% максимального [47]. Таким чином, схема визначення сумарного навантаження від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю та натиску вітру має вигляд, представлений на рис. 3.7.

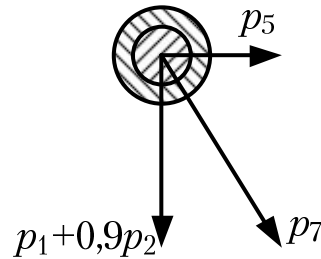


Рис. 3.7. Сумарне навантаження від ваги проводу, покритого ожеледдю та тиску вітру

Одиничне та питоме сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру визначають за виразами

$$\begin{aligned} p_7 &= \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2}; \\ \gamma_7 &= \frac{p_7}{F}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Розрахункові схеми та відповідні вирази до визначення одиничних навантажень на проводи та троси повітряних ліній електропередавання зведено до табл. 3.15.

Відповідно до співвідношення механічних навантажень від ваги ожеледі та натиску вітру найбільшого значення можуть набувати одиничні (питомі) навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю, ваги проводу та натиску вітру або навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю і натиску вітру. Режим, в якому спостерігаються найбільші механічні навантаження (максимальної ожеледі, максимального вітру або вітру під час ожеледі) називають *режимом максимальних навантажень*.

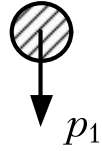
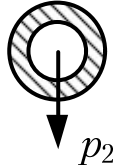
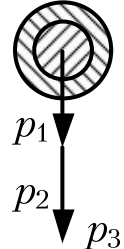
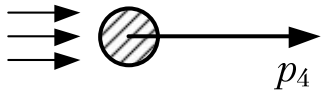
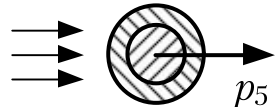
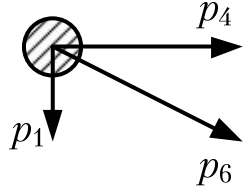
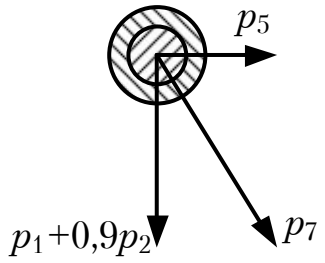
В більшості практичних випадків максимальних навантажень провід (трос) зазнає в режимі вітру під час ожеледі. Але, за певних співвідношень між постійними та кліматичними навантаженнями режимом максимальних навантажень виявляється режим максимальної ожеледі або режим максимального вітру. Так, наприклад, в режимі максимальної ожеледі навантаження стають найбільшими за умови

$$\begin{cases} p_3 > p_6; \\ p_3 > p_7; \end{cases} \begin{cases} p_1 + p_2 > \sqrt{p_1^2 + p_4^2}; \\ p_1 + p_2 > \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2}, \end{cases}$$

тобто у разі, коли

$$\begin{cases} p_4 < \sqrt{p_2^2 + 2p_1p_2}; \\ p_5 < \sqrt{0,19p_2^2 + 0,2p_1p_2}. \end{cases}$$

Таблиця 3.15. Розрахункові схеми до визначення
одиничних навантажень на проводи та троси повітряної лінії

| № з/п | Тип навантаження | Розрахункова схема |
|----------|---|---|
| 1 | Навантаження від власної ваги проводу $p_1 = g \cdot G_0 \cdot 10^{-3}$ |  |
| 2 | Навантаження від ваги відкладень ожеледі $p_2 = 0,9g\gamma_{fm}\pi k_{\mu}b(d + k_{\mu}b)10^{-3}$ |  |
| 3 | Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю $p_3 = p_1 + p_2$ |  |
| 4 | Навантаження від натиску вітру $p_4 = \gamma_{f\max}C_{dc}C_xC_cqd \cdot 10^{-3}$ |  |
| 5 | Навантаження від натиску вітру на про- води, вкриті ожеледдю $p_5 = 1,2\gamma_{fQ}C_{dc}C_cq'd \cdot 10^{-3}$ |  |
| 6 | Сумарне навантаження від ваги проводу та натиску вітру $p_6 = \sqrt{p_1^2 + p_4^2}$ |  |
| 7 | Сумарне навантаження від ваги проводу, покритого ожеледдю, та натиску вітру $p_7 = \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2}$ |  |

Режимом максимальних навантажень є режим максимального вітру за умови

$$\begin{cases} p_6 > p_3; \\ p_6 > p_7; \end{cases} \begin{cases} \sqrt{p_1^2 + p_4^2} > p_1 + p_2; \\ \sqrt{p_1^2 + p_4^2} > \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2}, \end{cases}$$

тобто у разі, коли

$$\begin{cases} p_4 > \sqrt{p_2^2 + 2p_1p_2}; \\ p_4 > \sqrt{\frac{0,81p_2^2 + 1,8p_1p_2}{1 - k^2}}, \end{cases}$$

де $k = p_5/p_4$ – співвідношення між одиничними навантаженнями в режимах вітру під час ожеледі та максимального вітру.

Своєю чергою максимальні навантаження спостерігаються в режимі вітру під час ожеледі за умови

$$\begin{cases} p_7 > p_3; \\ p_7 > p_6; \end{cases} \begin{cases} \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2} > p_1 + p_2; \\ \sqrt{(p_1 + 0,9p_2)^2 + p_5^2} > \sqrt{p_1^2 + p_4^2}, \end{cases}$$

тобто у разі, коли

$$\begin{cases} p_5 > \sqrt{0,19p_2^2 + 0,2p_1p_2}; \\ p_4 < \sqrt{\frac{0,81p_2^2 + 1,8p_1p_2}{1 - k^2}}, \end{cases}$$

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення одиничних та питомих навантажень на проводи повітряних ліній електропередавання.
2. Перелічіть вертикальні, горизонтальні та сумарні навантаження на проводи повітряних ліній.
3. Поясніть зміст коефіцієнтів надійності у визначенні вітрових та ожеледних навантажень
4. Дайте визначення характеристичних значень ожеледі в розрахунках механічних навантажень на конструктивні елементи повітряної лінії.
5. Поясніть особливості визначення ожеледних навантажень на проводи повітряних ліній.
6. Дайте визначення характеристичних значень вітрових навантажень в розрахунках механічних конструкцій повітряних ліній електропередавання.

7. Поясніть особливості визначення вітрових та вітрових під час ожеледі навантажень на проводи повітряних ліній.
8. Дайте визначення режиму максимальних навантажень.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 65-71; [29], с. 357-362; [34], с. 28-32.

3.3. РІВНЯННЯ СТАНУ ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

Під час експлуатації повітряних ліній електропередавання на проводи та троси діють різні навантаження та впливи (температура оточуючого повітря, відкладення ожеледі, натиск вітру тощо), які змінюються у часі та визначають поточний стан проводу. Так, із збільшенням температури повітря проводи здовжуються, стріли провисання збільшуються, а напруження проводу зменшується. Під впливом ожеледних навантажень стріли провисання також збільшуються, але під впливом додаткового навантаження від ваги ожеледі на проводах, також збільшується напруження проводу. Таким чином, зміна умов функціонування повітряних ліній електропередавання призводить до зміни таких характеристик, як одиничні та питомі навантаження, напруження проводу, стріла провисання проводу у прогоні.

Розглянемо зміну механічних характеристик проводу внаслідок зміни кліматичних навантажень та впливів. На рис. 3.8 показано два стани проводу за різних кліматичних умов. Індексом «0» позначено параметри деякого вихідного режиму, який характеризується температурою повітря t_0 , питомим навантаженням на провід γ_0 , механічним напруженням в матеріалі проводу σ_0 та довжиною проводу L_0 . Другий режим, обумовлений зміною кліматичних умов в районі траси лінії, характеризуються такими самими параметрами, представленими на рис. 3.8 без індексів.

Внаслідок зміни кліматичних умов в районі траси лінії довжина проводу змінюється та становить

$$L = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2}.$$

Здовження проводу через зміну умов експлуатації дорівнює

$$\Delta L = L - L_0 = \frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} - \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2}. \quad (3.15)$$

З іншого боку зміна довжини проводу відбувається внаслідок пружного розтягування та теплового здовження проводу.

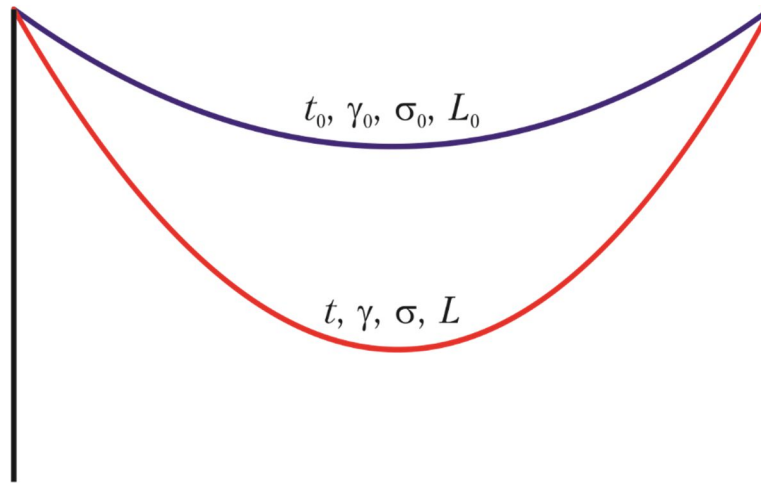


Рис. 3.8. Зміна параметрів проводу через зміну кліматичних навантажень та впливів

Пружне розтягування проводу визначається рівнянням закону Гука

$$\Delta L' = L_0 \frac{\sigma - \sigma_0}{E},$$

де E – модуль пружності проводу.

Теплове здовження проводу визначається рівнянням закону теплового розширення речовини

$$\Delta L'' = L_0 \alpha (t - t_0),$$

де α – коефіцієнт теплового здовження проводу.

Сумісна дія пружного розтягування та теплового здовження визначає зміну довжини проводу

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_0 \left(1 + \frac{\sigma - \sigma_0}{E} \right) (1 + \alpha (t - t_0)) - L_0 = \\ &= L_0 \frac{\sigma - \sigma_0}{E} + L_0 \alpha (t - t_0) + L_0 \frac{\alpha}{E} (\sigma - \sigma_0) (t - t_0). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Відомо, що напруження в матеріалі проводу має порядок 10^6 (МПа), модуль пружності сталевалюмінієвого проводу – 10^9 (ГПа), а коефіцієнт теплового здовження – 10^{-6} . Це означає різні порядки доданків у виразі (3.16) (10^{-3} , 10^{-6} та 10^{-9} відповідно). Умови забезпечення інженерної точності дозволяють знехтувати останнім доданком, який має найнижчий порядок. Крім того відомо, що довжина проводу у прогоні майже не відрізняється від довжини прогону, що дозволяє з достатньою інженерною точністю замінити у виразі (3.16) довжини проводу на довжину прогону. В результаті вираз (3.16) спрощується та набуває вигляду

$$\Delta L = l \frac{\sigma - \sigma_0}{E} + l\alpha(t - t_0). \quad (3.17)$$

Дорівнюємо між собою вирази (3.15) та (3.17):

$$\frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} - \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} = l \frac{\sigma - \sigma_0}{E} + l\alpha(t - t_0). \quad (3.18)$$

Якщо помножити обидві частини рівняння (3.18) на модуль пружності E , скоротити на довжину прогону l та перенести в ліву частину всі складові, які містять напруження проводу після зміни кліматичних умов, отримуємо

$$\sigma - \frac{\gamma^2 E l^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t - t_0). \quad (3.19)$$

Рівняння (3.19) називають рівнянням стану проводу у прогоні [6, 7, 34]. Таке рівняння визначає зміну механічного напруження в матеріалі проводу внаслідок зміни кліматичних навантажень та впливів в районі траси лінії. Зазначимо, що рівняння (3.19) є наближеним, оскільки отримано із певними допущеннями, проте його використання дає прийнятні результати під час механічних розрахунків повітряних ліній [31].

Аналіз виразу (3.19) свідчить про те, що рівняння проводу у прогоні являє собою неповне кубічне рівняння. Дійсно, позначимо

$$\frac{\gamma^2 E l^2}{24} = A; \quad \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t - t_0) = B.$$

Тоді рівняння (3.19) набуває вигляду

$$\sigma - \frac{A}{\sigma^2} = B,$$

або

$$\sigma^3 - B\sigma^2 - A = 0. \quad (3.20)$$

Фізичний зміст має лише дійсний додатній корінь рівняння (3.20). Такий корінь можна визначити за аналітичним виразом

$$\sigma = \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9C}, \quad (3.21)$$

де

$$C = \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + A\frac{B^3}{27}}.$$

Таким чином вираз (3.21) дозволяє визначити механічне напруження в матеріалі проводу у будь-якому можливому кліматичному режимі експлуатації повітряної лінії, якщо відомі характеристики проводу у будь-якому іншому режимі.

Для розв'язання деяких практичних задач рівняння стану проводу у прогоні інколи подають у вигляді залежності стріли провисання проводу від поточних умов експлуатації лінії. Вираз (2.31) визначає однозначний зв'язок між напруженням проводу та стрілою провисання. В результаті вираз (3.19) набуває вигляду

$$\frac{\gamma l^2}{8f} - \frac{8}{3} \frac{Ef^2}{l^2} = \frac{\gamma_0 l^2}{8f_0} - \frac{8}{3} \frac{Ef_0^2}{l^2} - \alpha E(t - t_0), \quad (3.22)$$

або

$$\frac{8}{3} \frac{E}{l^2} (f^2 - f_0^2) - \frac{l^2}{8} \left(\frac{\gamma}{f} - \frac{\gamma_0}{f_0} \right) = \alpha E(t - t_0),$$

де f, f_0 – стріли провисання в поточному та вихідному режимах відповідно.

Для ліній електропередавання, траси яких проходять по сильно пересічених, наприклад, гірській місцевості, слід застосовувати рівняння стану проводу у вигляді

$$\frac{\sigma}{\cos \theta} - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} \cos^2 \theta = \frac{\sigma_0}{\cos \theta} - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} \cos^2 \theta - \alpha E(t - t_0),$$

де θ – кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводу на суміжних опорах до горизонталі.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Поясніть причини зміни механічних характеристик проводу в прогоні внаслідок зміни кліматичних умов в районі траси лінії.
2. Наведіть вираз основного рівняння стану проводу у прогоні.
3. Поясніть призначення основного рівняння стану проводу у прогоні.
4. Поясніть положення про похибку розрахунку за рівнянням стану проводу у прогоні.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 106-109; [29], с. 367-369; [34], с. 47-49; [49], с. 398-401; [63], с. 519-521.

3.4. ЗВЕДЕНИЙ ПРОГІН

Зазначимо, що через неоднорідність рельєфу вздовж траси лінії, перетинання лінії з інженерними спорудами прогони анкерованої ділянки не однакові, як показано на рис. 3.9. Якщо б проводи на проміжних опорах були жорстко закріплені, то, відповідно до рівняння стану проводу у (3.19), тяжіння в прогонах не були б однаковими. Очевидно, чим більша довжина прогону та більша вага проводу у прогоні, тим більшого тяжіння зазнає провід. Внаслідок виникнення різниці тяжінь на суміжних прогонах ізоляційні підвіси на проміжних опорах відхиляються від вертикального стану. В результаті короткі прогони збільшуються, великі – скорочуються, а на всій анкерованій ділянці встановлюється однакове тяжіння. На рис. 3.9 пунктирною лінією показано положення проводу за умови його жорсткого закріплення на проміжних опорах анкетованої ділянки. Суцільною лінією показано положення проводу, обумовлене відхиленням ізоляційних підвісів.

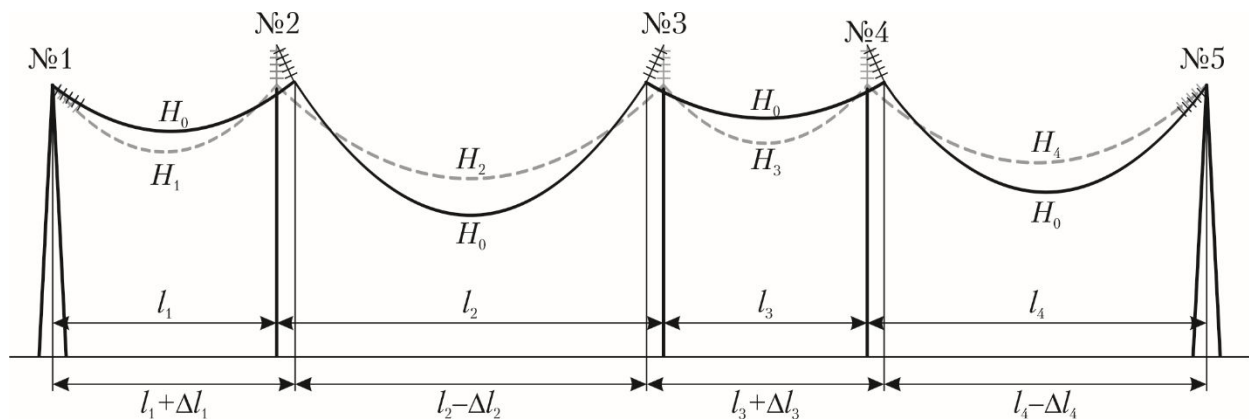


Рис. 3.9. Відхилення підтримуючих ізоляційних підвісів на анкерованій ділянці

Зміну тяжіння у матеріалі проводу через переміщення точок його закріплення, наприклад, через відхилення ізоляційного підвісу та зміну довжини прогону, називають *редукцією*. Усталене значення тяжіння у проводі внаслідок редукції називають *редукованим*.

Зазначимо, що відхилення ізоляційних підвісів на проміжних опорах не фіксоване і змінюється із зміною кліматичних умов в районі траси лінії. Розглянемо формування рівняння стану проводу у прогоні з урахуванням редукції. Розрахункова схема такого прогону показана на рис. 3.10, де індексами «0» позначено параметри проводу в деякому вихідному режимі, за якого редукція відсутня і ізоляційний підвіс знаходиться у невідхиленому вертикальному стані. Положення проводу в такому режимі показано пунктирною лінією. Редукція полягає у зсуві точки закріплення проводу

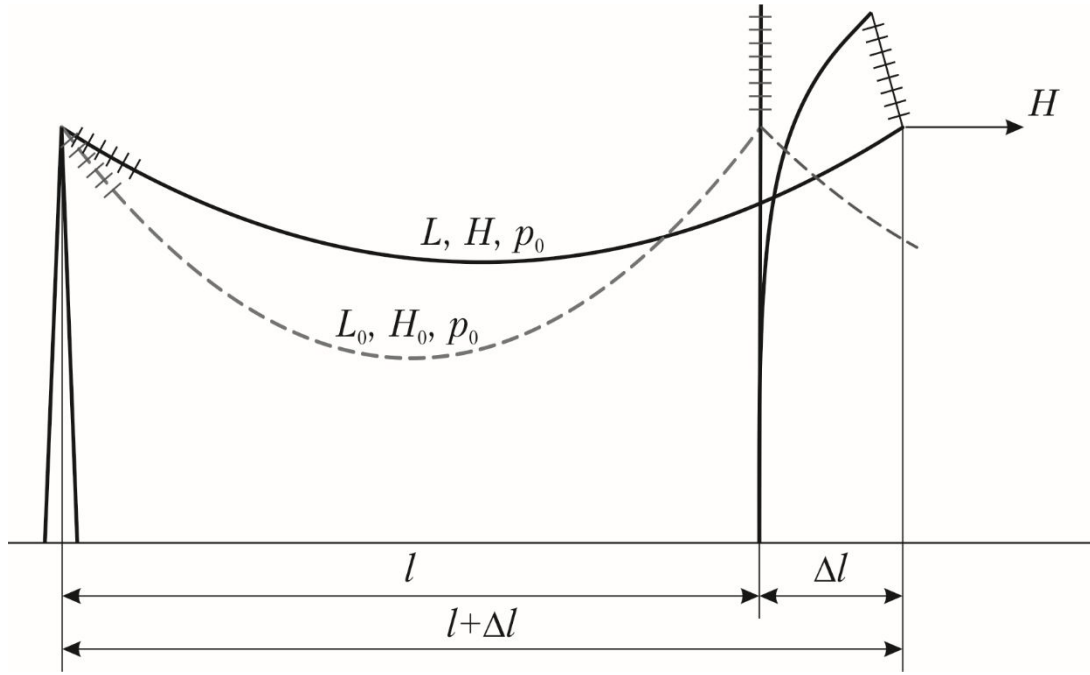


Рис. 3.10. Зміна довжини прогону через вигин опори та відхилення ізоляційного підвісу

на проміжній опорі через вигин опори та відхилення ізоляційного підвісу. Положення проводу в такому стані показано суцільною лінією. Параметри проводу в редукованому режимі показано без індексів.

Вираз (3.15) для визначення зміни довжини проводу внаслідок редукування набуває вигляду

$$\Delta L = \Delta l + \frac{\gamma^2 (l + \Delta l)^3}{24\sigma^2} - \frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2} = \Delta l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} \left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right)^3 - \frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2}. \quad (3.23)$$

Якщо у виразі (3.23) знехтувати відношенням $\frac{\Delta l}{l}$, яке набагато менше за одиницю, рівняння (3.23) спрощується

$$\Delta L = \Delta l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} - \frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2}. \quad (3.24)$$

Зміну довжини проводу можна також подати як результат накладання пружної деформації та теплового здовження проводу відповідно до виразу (3.17). Якщо дорівняти між собою вирази (3.17) та (3.24) отримуємо

$$\frac{l}{E}(\sigma - \sigma_0) + l\alpha(t - t_0) = \Delta l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma^2} - \frac{\gamma_0^2 l^3}{24\sigma_0^2}.$$

Низка перетворень дає наступний результат

$$\sigma - \frac{\gamma^2 E l^2}{24 \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0) + \frac{\Delta l}{l} E. \quad (3.25)$$

Отриманий вираз (3.25) являє собою рівняння стану проводу у прогоні з урахуванням редукції.

Такі рівняння можна записати для всіх прогонів анкерованої ділянки

$$\sigma - \frac{\gamma^2 E l_i^2}{24 \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l_i^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0) + \frac{\Delta l_i}{l_i} E, \quad (3.26)$$

де l_i та Δl_i – довжина та зміна довжини i -го прогону анкерованої ділянки відповідно; σ – встановлене механічне напруження в матеріалі проводу на всіх прогонах анкерованої ділянки.

Запишемо такі вирази для всіх прогонів анкерованої ділянки, помножимо кожний вираз на довжину відповідного прогону та просумуємо:

$$\sigma \sum l_i - \frac{\gamma^2 E \sum l_i^3}{24 \sigma^2} = \sigma_0 \sum l_i - \frac{\gamma_0^2 E \sum l_i^3}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0) \sum l_i + E \sum \Delta l_i, \quad (3.27)$$

де $\sum l_i$ – довжина анкерованої ділянки; $\sum \Delta l_i$ – сума змін довжин всіх прогонів анкерованої ділянки.

Очевидно, що сума змін довжин всіх прогонів анкерованої ділянки завжди дорівнює нулю. Дійсно, відхилення гірлянди ізоляторів на кожній проміжній опорі збільшує один з суміжних прогонів та на таку саме величину зменшує інший, тобто відхилення кожного ізоляційного підвісу обумовлює дві зміни довжин прогонів однакові за значенням, але протилежні за знаком. До того ж умовно вважають, що точки закріплення проводів на анкерних опорах жорстко закріплені та не рухаються внаслідок зміни тягіння проводу. Таким чином, останній доданок виразу (3.27) завжди дорівнює нулю.

Розділимо вираз (3.27) на довжину анкерованої ділянки та введемо позначення $\sum l_i^3 / \sum l_i = l_{зв}^2$:

$$\begin{aligned} \sigma - \frac{\gamma^2 E \sum l_i^3 / \sum l_i}{24 \sigma^2} &= \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \sum l_i^3 / \sum l_i}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0); \\ \sigma - \frac{\gamma^2 E l_{зв}^2}{24 \sigma^2} &= \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E l_{зв}^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0), \end{aligned} \quad (3.28)$$

де $l_{зв}$ – довжина зведеного прогону:

$$l_{зв} = \sqrt{\sum l_i^3 / \sum l_i}. \quad (3.29)$$

Очевидно, що вираз (3.28) являє собою рівняння стану проводу у прогоні для фіктивного зведеного прогону.

Зведеним називають фіктивний еквівалентний прогін, який обумовлює таке саме напруження проводу, що й встановлене напруження на прогонах анкерованої ділянки, обумовлене редукцією [7].

Слід зазначити, що вираз рівняння стану проводу у прогоні з урахуванням редукції (3.25) базується на допущенні про однакове тяжіння в точках закріплення проводу на суміжних опорах, що має місце лише за умови розташування опор на ідеально рівній місцевості. В реальних умовах завжди спостерігається різниця тяжіння в точках закріплення проводу, обумовлена перепадом висот цих точок. Це необхідно враховувати у разі проходження лінії по сильно пересіченій (гірській) місцевості із істотним перепадом висот точок закріплення проводу [8]. Для таких умов довжину зведеного прогону слід визначати за виразом

$$l_{\text{зв}} = \frac{1}{\cos \theta_{\text{зв}}} \sqrt{\frac{\sum l_i^3}{\sum l_i / \cos^2 \theta_i}}, \quad (3.30)$$

де θ_i – кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводів на опорах i -го прогону, $\theta_{\text{зв}}$ – зведений кут нахилу:

$$\cos \theta_{\text{зв}} = \frac{\sum l_i / \cos^2 \theta_i}{\sum l_i / \cos^3 \theta_i}.$$

Зазначимо, що виразом (3.30) слід користуватися у разі перепаду висот точок закріплення проводу, який перевищує 25% довжини прогону, тобто за умови

$$\text{tg } \theta \geq 0,25.$$

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Поясніть причину відхилення підтримуючих ізоляційних підвісів на проміжних опорах анкерованої ділянки.
2. Наведіть вираз основного рівняння стану проводу у прогоні з урахуванням редукції.
3. Дайте визначення зведеного прогону.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 186-193.

3.5. КРИТИЧНІ ПРОГОНИ

Відповідно до методу допустимих напружень необхідно забезпечити таку конструкцію повітряної лінії, щоб за будь-яких можливих кліматичних умов напруження проводів та тросів не перевищували своїх допустимих значень. Також слід запобігати невиннованим завищеним капіталовкладень в конструкцію повітряної лінії, які забезпечують механічну міцність конструкції, більшу за необхідну. Таким чином, з метою забезпечення прийнятних техніко-економічних показників повітряної лінії, є доцільним конструктивне забезпечення допустимих механічних напружень проводів лінії в режимі, який характеризується найбільшими значеннями напруження проводу. Тоді в інших можливих режимах механічні напруження проводів гарантовано не перевищать своїх допустимих значень.

Отже, задача проектування механічної частини повітряної лінії зводиться до визначення кліматичного режиму, за якого спостерігаються найбільші напруження в проводах та тросах лінії. Відповідний кліматичний режим прийнято називати вихідним.

Оскільки чинні нормативні документи визначають два значення гранично допустимих напружень в матеріалі проводу для короткочасних режимів максимальних навантажень і мінімальних температур та для довготривалого експлуатаційного режиму, вибір вихідного режиму слід здійснювати саме серед цих трьох кліматичних режимів:

- 1) режиму мінімальних температур;
- 2) режиму максимальних навантажень
 - 2а) максимальної ожеледі;
 - 2б) вітру під час ожеледі;
 - 2в) максимального вітру;
- 3) експлуатаційного режиму.

Критерієм вибору вихідного режиму служать довжини критичних прогонів [7, 16].

Розглянемо залежність напруженості в матеріалі проводу від температури оточуючого повітря та механічних навантажень для малих та великих прогонів.

Припустимо, що довжина прогону є нескінченно малою ($l \rightarrow 0$). У цьому разі рівняння стану проводу у прогоні (3.19) набуває вигляду

$$\sigma = \sigma_0 - \alpha E (t - t_0). \quad (3.31)$$

Аналіз рівняння (3.31) свідчить про те, що для малих прогонів механічне напруження в матеріалі проводу визначається, в основному, режимом температури і набуває свого максимального значення в режимі мінімальних температур.

Розглянемо далі прогін, довжина якого є нескінченно великою ($l \rightarrow \infty$). У цьому разі всі складові рівняння стану проводу у прогоні (3.19) слід розділити на l^2 :

$$\frac{\sigma}{l^2} - \frac{\gamma^2 E}{24\sigma^2} = \frac{\sigma_0}{l^2} - \frac{\gamma_0^2 E}{24\sigma_0^2} - \frac{\alpha E}{l^2}(t - t_0). \quad (3.32)$$

В результаті для нескінченно великого прогону рівняння (3.32) набуває вигляду

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\gamma}{\gamma_0}. \quad (3.33)$$

Аналіз рівняння (3.33) свідчить про те, що у великих прогонах напруження визначається, в основному, механічним навантаженням і набуває свого максимального значення в режимі максимальних навантажень.

Очевидно, що між розглянутими двома граничними прогонами є такий, в якому напруження в матеріалі проводу досягає своїх гранично допустимих значень і в режимі мінімальної температури, і в режимі максимальних навантажень. Такий прогін називають критичним, або другим критичним прогоном [7, 29].

Визначення другого критичного прогону проілюстровано на рис. 3.11, де $\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}}$ – гранично допустиме напруження проводу в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень; крива 1 визначає залежність напруження проводу в режимі мінімальних температур від довжини прогону у разі вибору режиму максимальних навантажень за вихідний режим; крива 2 визначає залежність напруження проводу в режимі максимальних навантажень від довжини прогону у разі вибору режиму мінімальних температур за вихідний режим; точка перетину кривих визначає другий критичний прогін.

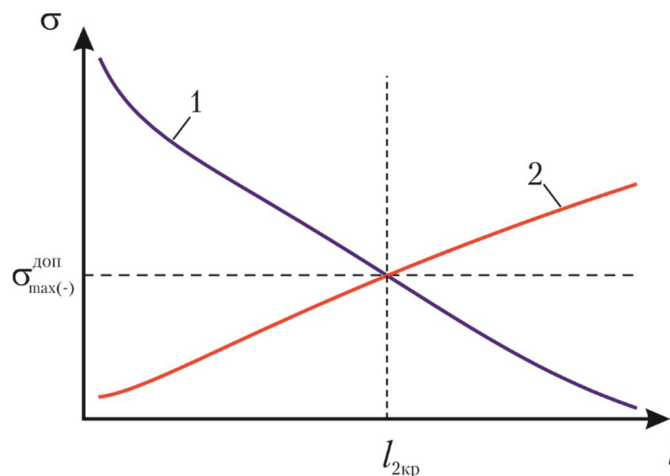


Рис. 3.11. Ілюстрація визначення другого критичного прогону

Очевидно, що для прогонів, менших другого критичного вибір режиму максимальних навантажень за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в режимі мінімальних температур. Так само, для прогонів, більших другого критичного вибір режиму мінімальних температур за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в режимі максимальних навантажень. Таким чином, порівняння фактичного (зведеного) прогону з другим критичним дозволяє зробити наступні висновки.

1. Якщо довжина фактичного (зведеного) прогону менша за другий критичний прогін, то напруження проводу набуває свого максимального значення в режимі мінімальних температур і цей режим слід прийняти за вихідний.

2. Якщо довжина фактичного (зведеного) прогону більша за другий критичний прогін, то напруження проводу набуває свого максимального значення в режимі максимальних навантажень і цей режим слід прийняти за вихідний.

Правило визначення вихідного режиму за другим критичним прогоном проілюстровано на рис. 3.12.

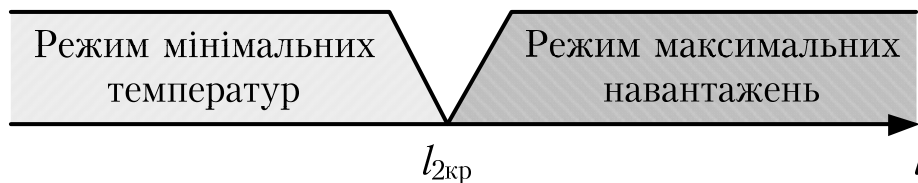


Рис. 3.12. Ілюстрація визначення вихідного режиму за другим критичним прогоном

Очевидно, що в такий самий спосіб можна визначити критичний прогін між двома будь-якими кліматичними режимами. Для визначення довжини критичного прогону до рівняння стану проводу у прогоні (3.19) слід підставити параметри порівнюваних режимів:

$$\sigma_I - \frac{\gamma_I^2 E l_{\text{кр}}^2}{24 \sigma_I^2} = \sigma_{II} - \frac{\gamma_{II}^2 E l_{\text{кр}}^2}{24 \sigma_{II}^2} - \alpha E (t_I - t_{II}), \quad (3.34)$$

де I, II – індекси параметрів порівнюваних режимів; i – індекс поточного критичного прогону.

З рівняння (3.34) випливає загальний вираз для визначення довжини критичного прогону [7, 31]

$$l_{\text{кр}} = \frac{\sigma_{II}}{\gamma_I} \sqrt{\frac{\sigma_{II} - \sigma_I + \alpha E (t_{II} - t_I)}{\frac{E}{24} \left[\left(\frac{\gamma_{II}}{\gamma_I} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \right)^2 \right]}}. \quad (3.35)$$

Для визначення довжини другого критичного прогону до виразу (3.35) слід підставити параметри граничних режимів – мінімальних температур та максимальних навантажень

$$l_{2\text{кр}} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow t_-, \sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}, \gamma_1 \\ II \rightarrow t_{\text{ож}}, \sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}, \gamma_{\text{max}} \end{array} \right\},$$

де γ_{max} – питоме навантаження в режимі найбільших навантажень.

В результаті отримуємо вираз для визначення другого критичного прогону

$$l_{2\text{кр}} = \frac{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}} - \sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}} + \alpha E (t_o - t_-)}{\frac{E}{24} \left[\left(\frac{\gamma_{\text{max}}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}}{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}} \right)^2 \right]}} = \frac{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{24\alpha (t_o - t_-)}{\left(\frac{\gamma_{\text{max}}}{\gamma_1} \right)^2 - 1}}. \quad (3.36)$$

В аналогічний спосіб визначають інші критичні прогони шляхом парного порівняння можливих вихідних режимів. Так, першим критичним називають прогін, в якому напруження проводу досягає своїх гранично допустимих значень в режимах мінімальних температур та в експлуатаційному режимі. Визначення першого критичного прогону проілюстровано на рис. 3.13, де $\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}$, $\sigma_{\text{е}}^{\text{доп}}$ – гранично допустимі напруження проводу в режимах мінімальних температур та експлуатаційному відповідно; крива 1 визначає залежність напруження проводу в режимі мінімальних температур від довжини прогону у разі вибору експлуатаційного режиму за вихідний; крива 2 визначає залежність напруження проводу в експлуатаційному режимі від довжини прогону у разі вибору режиму мінімальних температур за вихідний.

Очевидно, що для прогонів, менших першого критичного вибір експлуатаційного режиму за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в режимі мінімальних температур. Так само, для прогонів, більших першого критичного вибір режиму мінімальних температур за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в експлуатаційному режимі.

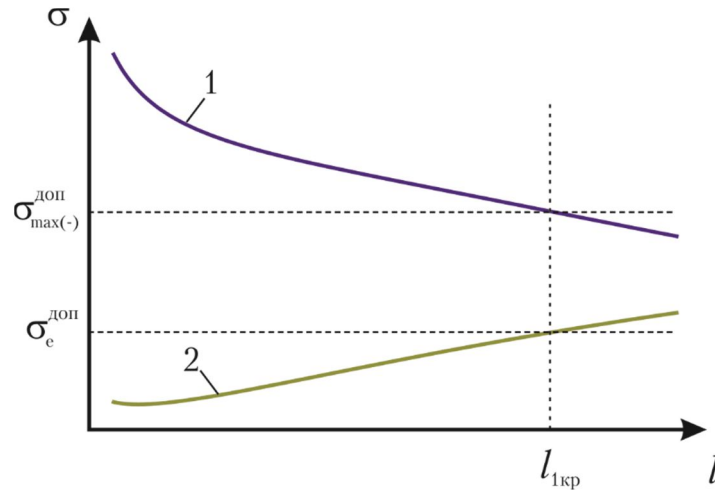


Рис. 3.13. Ілюстрація визначення першого критичного прогону

Для визначення першого критичного прогону до виразу (3.35) слід підставити параметри граничних режимів – мінімальних температур та експлуатаційного

$$l_{\text{кр}} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow t_-, \sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}, \gamma_1 \\ II \rightarrow t_e, \sigma_e^{\text{доп}}, \gamma_1 \end{array} \right\}.$$

В результаті отримуємо вираз

$$l_{\text{кр}} = \frac{\sigma_e^{\text{доп}}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e^{\text{доп}} - \sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}} + \alpha E (t_e - t_-)}{\frac{E}{24} \left[1 - \left(\frac{\sigma_e^{\text{доп}}}{\sigma_{\text{max}(-)}^{\text{доп}}} \right)^2 \right]}}. \quad (3.37)$$

Порівняння фактичного (зведеного) прогону з першим критичним дозволяє зробити наступні висновки (див. рис. 3.14).

1. Якщо фактичний (зведений) прогін менший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого гранично допустимого значення в режимі мінімальних температур і цей режим слід прийняти як вихідний.

2. Якщо фактичний (зведений) прогін більший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого гранично допустимого значення в експлуатаційному режимі і цей режим слід прийняти як вихідний.

Слід зазначити, що відповідно до виразу (3.37) можливі такі співвідношення між параметрами проводу та кліматичними умовами в порівнюваних режимах, коли довжина першого критичного прогону характеризується уявною величиною. У цьому разі як вихідний слід прийняти експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного (зведеного) прогону.

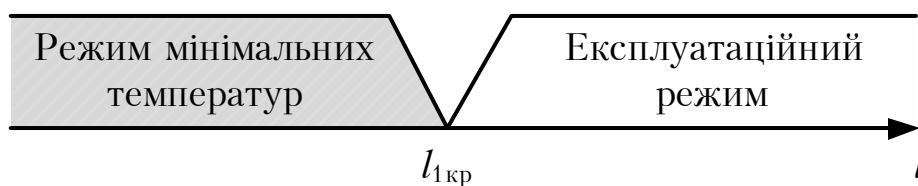


Рис. 3.14. Ілюстрація визначення вихідного режиму за першим критичним прогоном

Третім критичним називають прогін, в якому механічне напруження проводу досягає своїх гранично допустимих значень в експлуатаційному режимі та режимі максимальних навантажень. Визначення третього критичного прогону проілюстровано на рис. 3.15, де $\sigma_{\max(-)}^{\text{доп}}$, $\sigma_{\text{е}}^{\text{доп}}$ – гранично допустимі напруження проводу в режимах максимальних навантажень та експлуатаційному відповідно; крива 1 визначає залежність напруження проводу в експлуатаційному режимі від довжини прогону у разі вибору режиму максимальних навантажень за вихідний режим; крива 2 визначає залежність напруження проводу в режимі максимальних навантажень від довжини прогону у разі вибору експлуатаційного режиму за вихідний.

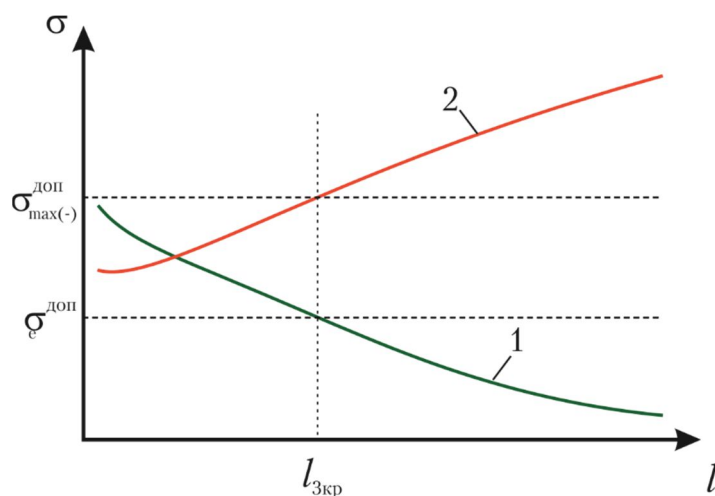


Рис. 3.15. Ілюстрація визначення третього критичного прогону

Очевидно, що для прогонів, менших третього критичного вибір режиму максимальних навантажень за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в експлуатаційному режимі. Так само, для прогонів, більших третього критичного вибір експлуатаційного режиму за вихідний обумовлює перевищення напруження проводу свого допустимого значення в режимі максимальних навантажень.

Для визначення довжини третього критичного прогону до виразу (3.35) слід підставити параметри граничних режимів – експлуатаційного та максимальних навантажень

$$l_{3кр} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I \rightarrow t_e, \sigma_e^{доп}, \gamma_1 \\ II \rightarrow t_{ож}, \sigma_{max(-)}^{доп}, \gamma_{max} \end{array} \right\}.$$

В результаті отримуємо вираз

$$l_{3кр} = \frac{\sigma_{max(-)}^{доп}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{max(-)}^{доп} - \sigma_e^{доп} + \alpha E (t_o - t_e)}{\frac{E}{24} \left[\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{max(-)}^{доп}}{\sigma_e^{доп}} \right)^2 \right]}}. \quad (3.38)$$

Порівняння фактичного прогону з третім критичним дозволяє зробити наступні висновки (див. рис. 3.16).

1. Якщо фактичний прогін менший за третій критичний, то напруження матеріалі проводу набуває свого допустимого значення в експлуатаційному режимі і цей режим слід прийняти як вихідний.
2. Якщо фактичний прогін більший за перший критичний, то напруження проводу набуває свого допустимого значення в режимі максимальних навантажень і цей режим слід прийняти як вихідний.

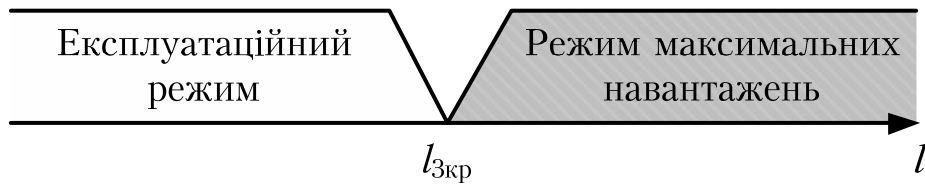


Рис. 3.16. Ілюстрація визначення вихідного режиму за третім критичним прогоном

Слід зазначити, що відповідно до виразу (3.38) можливі такі співвідношення між параметрами проводу в порівнюваних режимах, коли довжина третього критичного прогону характеризується уявною величиною. У цьому разі як вихідний слід прийняти експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного прогону.

В практиці проектування повітряних ліній електропередавання вибір вихідного режиму реалізують на підставі порівняння розрахованих значень довжин трьох критичних прогонів між собою та з довжиною фактичного (зведеного) прогону. Тут розглядають п'ять характерних комбінацій [31].

1. $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$ (див. рис. 3.17).

За такого співвідношення між критичними прогонами фактичний прогін лінії електропередавання необхідно порівнювати з першим та третім критичними прогонами. Якщо довжина фактичного прогону менша від першого критичного ($l < l_{1кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. Якщо довжина фактичного прогону перебуває в діапазоні між

першим та третім критичними прогонами ($l_{1кр} < l < l_{3кр}$), за вихідний приймають експлуатаційний режим. Якщо довжина фактичного прогону більша за третій критичний ($l > l_{3кр}$), за вихідний приймають режим найбільших навантажень.

2. $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$ (див. рис. 3.18).

У цьому разі фактичний прогін порівнюють з другим критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від другого критичного ($l < l_{2кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. В іншому разі ($l > l_{2кр}$) – режим найбільших навантажень.

3. $l_{1кр}$ уявний, $l_{2кр} < l_{3кр}$ (див. рис. 3.19).

У цьому разі фактичний прогін необхідно порівнювати із третім критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від третього критичного ($l < l_{3кр}$), за вихідний приймають експлуатаційний режим. В іншому разі ($l > l_{3кр}$) – режим найбільших навантажень.

4. $l_{3кр}$ уявний, $l_{1кр} < l_{2кр}$ (див. рис. 3.20).

За таких співвідношень фактичний прогін слід порівнювати з першим критичним. Якщо довжина фактичного прогону менша від першого критичного ($l < l_{1кр}$), за вихідний приймають режим мінімальних температур. В іншому разі ($l > l_{1кр}$) – експлуатаційний режим.

5. $l_{1кр}$ та $l_{3кр}$ уявні (див. рис. 3.21).

У цьому разі за вихідний обирають експлуатаційний режим за будь-якої довжини фактичного прогону.

Співвідношення щодо вибору вихідного кліматичного режиму зведені у табл. 3.16.

Можна запропонувати наступний оптимальний алгоритм визначення вихідного кліматичного режиму [64].

1. За виродженим рівнянням стану проводу у прогоні для нескінченно малого прогону (3.31) розраховують напруження в експлуатаційному режимі, якщо за вихідний прийнято режим мінімальних температур

$$\sigma_e^{(1)} = \sigma_{\max(-)}^{\text{доп}} - \alpha E (t_e - t_-).$$

У разі, якщо отримане значення напруження перевищує допустиме в експлуатаційному режимі, тобто

$$\sigma_e^{(1)} > \sigma_e^{\text{доп}},$$

то перший критичний прогін характеризується уявною величиною. В іншому разі розраховують перший критичний прогін за виразом

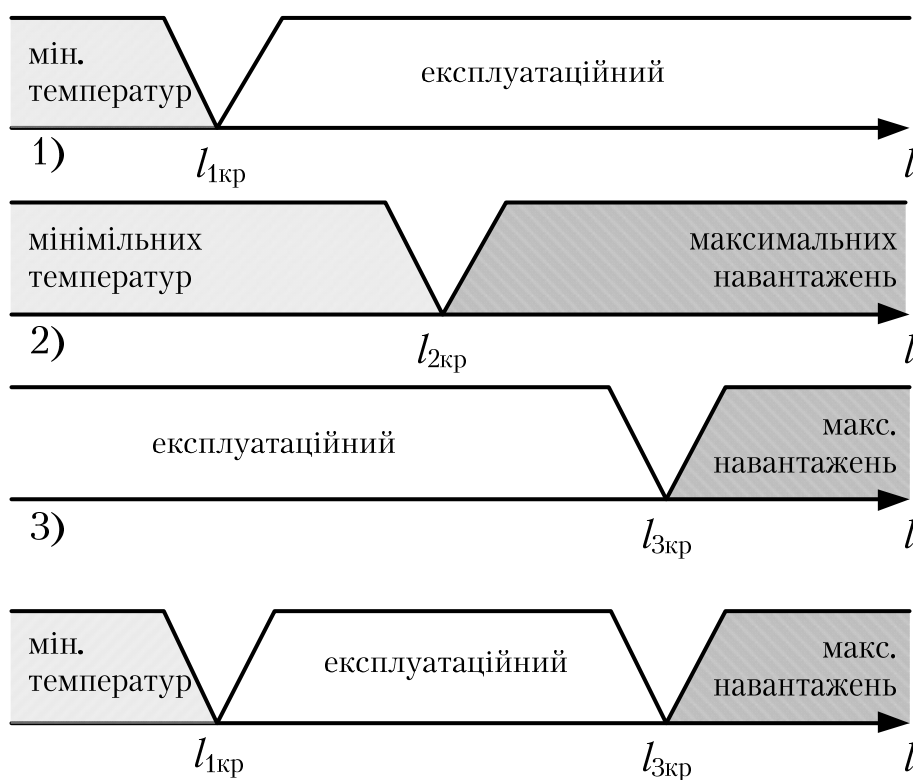


Рис. 3.17. Вибір вихідного кліматичного режиму за умови $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$

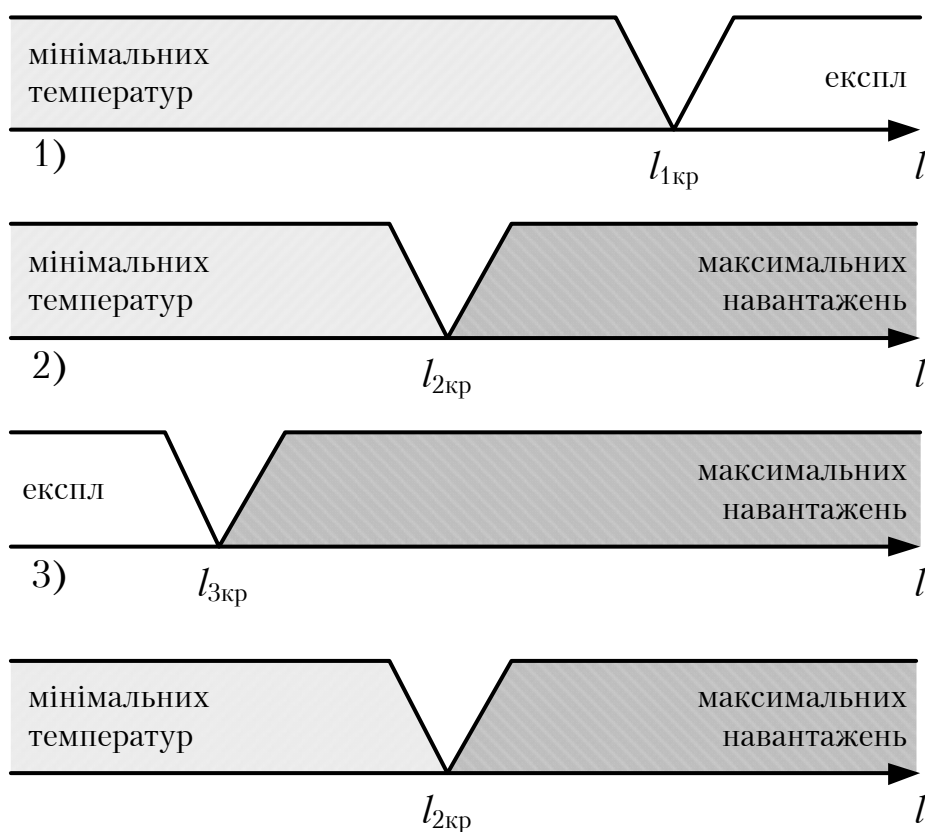


Рис. 3.18. Вибір вихідного кліматичного режиму за умови $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$

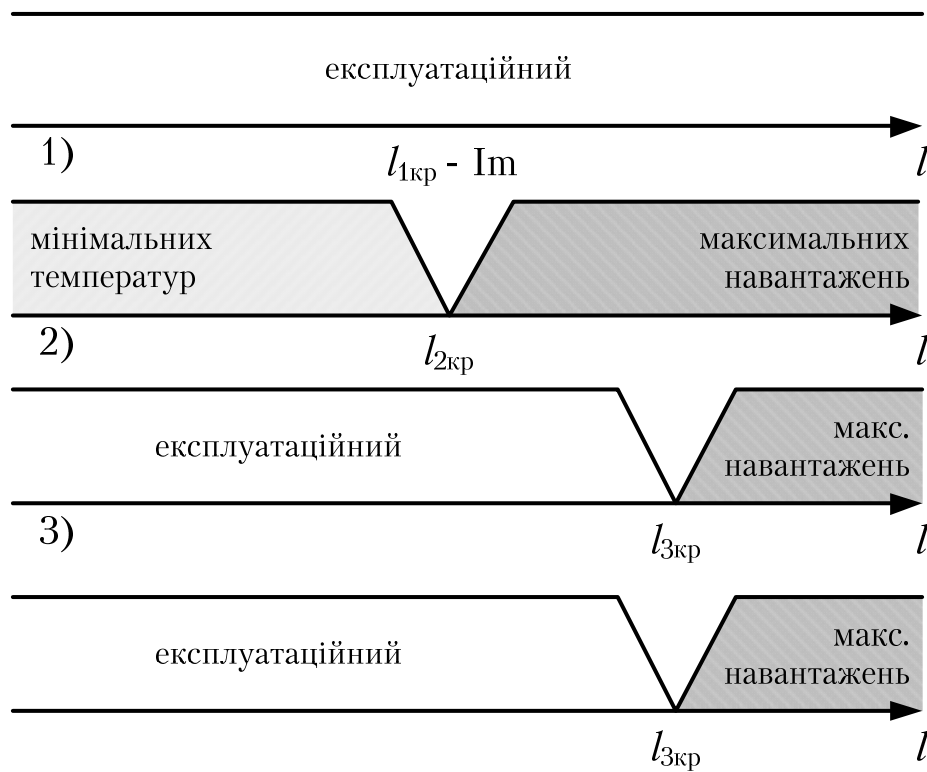


Рис. 3.19. Вибір вихідного кліматичного режиму за умови $l_{1кр}$ уявний, $l_{2кр} < l_{3кр}$

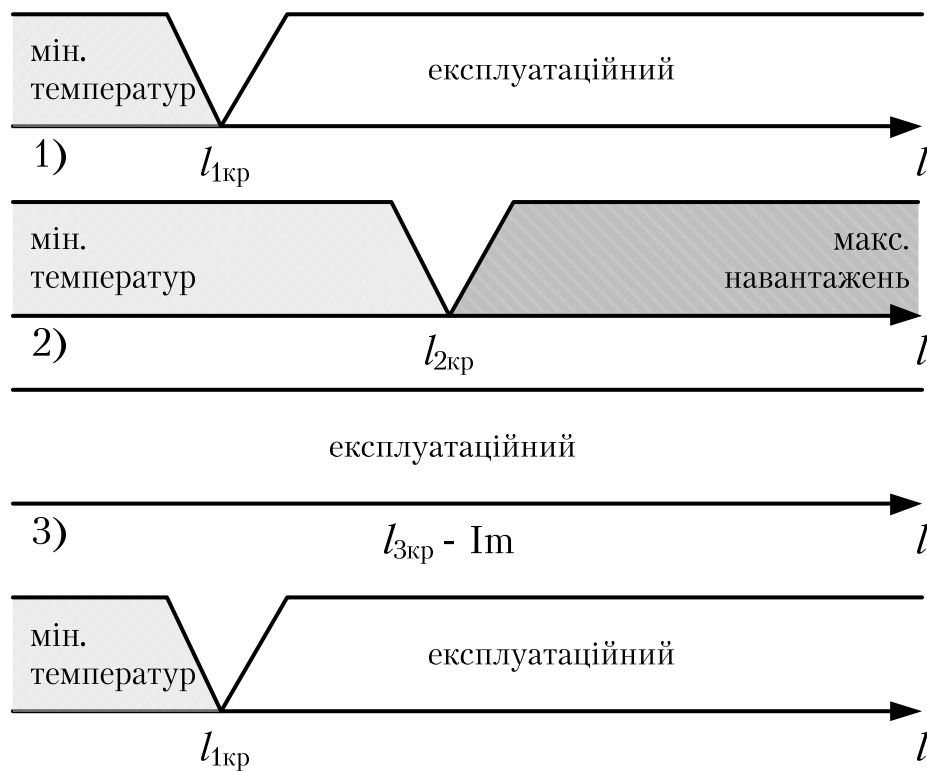


Рис. 3.20. Вибір вихідного кліматичного режиму за умови $l_{3кр}$ уявний, $l_{1кр} < l_{2кр}$

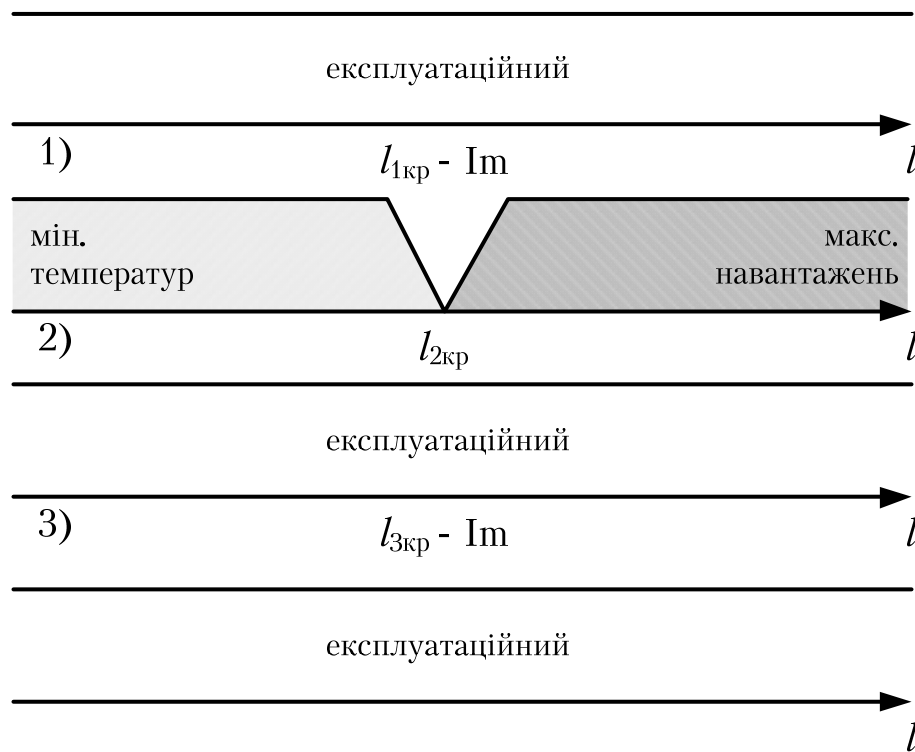


Рис. 3.21. Вибір вихідного кліматичного режиму за умови $l_{1кр}$, $l_{3кр}$ уявні

Таблиця 3.16. Співвідношення щодо вибору вихідного режиму

| № | Співвідношення прогонів | Розрахунковий прогін | Критерій | Вихідний режим |
|---|--|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 | $l_{1кр} < l_{2кр} < l_{3кр}$ | $l_{1кр}$ і $l_{3кр}$ | $l < l_{1кр}$ | мінімальних температур |
| | | | $l_{1кр} < l < l_{3кр}$ | експлуатаційний |
| | | | $l > l_{3кр}$ | максимальних навантажень |
| 2 | $l_{1кр} > l_{2кр} > l_{3кр}$ | $l_{2кр}$ | $l < l_{2кр}$ | мінімальних температур |
| | | | $l > l_{2кр}$ | максимальних навантажень |
| 3 | $l_{1кр}$ уявний, $l_{2кр} < l_{3кр}$ | $l_{3кр}$ | $l < l_{3кр}$ | експлуатаційний |
| | | | $l > l_{3кр}$ | максимальних навантажень |
| 4 | $l_{3кр}$ уявний, $l_{1кр} < l_{2кр}$ | $l_{1кр}$ | $l < l_{1кр}$ | мінімальних температур |
| | | | $l > l_{1кр}$ | експлуатаційний |
| 5 | $l_{1кр}, l_{3кр}$ уявний | — | — | експлуатаційний |

$$l_{1кр} = \frac{\sigma_e^{доп}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e^{доп} - \sigma_e^{(1)}}{\frac{E}{24} \left[1 - \left(\frac{\sigma_e^{доп}}{\sigma_{max(-)}^{доп}} \right)^2 \right]}}.$$

2. За виродженим рівнянням стану проводу у прогоні для нескінченно малого прогону (3.31) розраховують напруження в експлуатаційному режимі, якщо за вихідний прийнято режим максимальних навантажень

$$\sigma_e^{(2)} = \sigma_{max(-)}^{доп} - \alpha E (t_e - t_o).$$

За виродженим рівнянням стану проводу у прогоні для нескінченно великого прогону (3.33) розраховують напруження в експлуатаційному режимі, якщо за вихідний прийнято режим максимальних навантажень

$$\sigma_e^{(3)} = \sigma_{max(-)}^{доп} \frac{\gamma_1}{\gamma_{max}}.$$

У разі, якщо

$$\sigma_e^{(2)} < \sigma_e^{доп} \text{ або } \sigma_e^{(3)} > \sigma_e^{доп},$$

але не одночасно, то третій критичний прогін характеризується уявною величиною. В іншому разі розраховують третій критичний прогін за виразом

$$l_{3кр} = \frac{1}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e^{(2)} - \sigma_e^{доп}}{\frac{E}{24} \left[\frac{1}{(\sigma_e^{(2)})^2} - \frac{1}{(\sigma_e^{доп})^2} \right]}}.$$

3. Якщо перший або третій, або обидва критичні прогони уявні визначають вихідний режим за третьою, четвертою або п'ятою характерними комбінаціями критичних прогонів.

В іншому разі, якщо перший критичний прогін менший за третій

$$l_{1кр} < l_{3кр},$$

вихідний кліматичний режим обирають за першою характерною комбінацією критичних прогонів.

І тільки у разі, коли

$$l_{1кр} > l_{3кр},$$

за виразом (3.36) розраховують другий критичний прогін та визначають вихідний режим за другою характерною комбінацією критичних прогонів.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Поясніть, у чому полягає особливість застосування методу допустимих напружень до розрахунку проводів повітряних ліній електропередавання.
2. Дайте визначення вихідного кліматичного режиму.
3. Поясніть сутність першого, другого та третього критичного прогонів.
4. Поясніть, яким чином обирають вихідний кліматичний режим.
5. Перелічіть та охарактеризуйте можливі співвідношення між критичними прогонами.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 109-111, 129-145; [16], с. 71-72, 79-81; [29], с. 369-371, 379-381; [34], с. 51-54.

3.6. КРИТИЧНА ТЕМПЕРАТУРА

Однією з цілей проектування механічної частини повітряної лінії електропередавання є дотримання конструкцією лінії в будь-яких можливих кліматичних умовах нормованих габаритних відстаней між проводами лінії і землею та інженерними спорудами. Тут особливої уваги заслуговує режим, за якого спостерігається найбільша стріла провисання проводу в прогоні. Очевидно, якщо в цьому режимі не буде порушуватися нормований габарит, то в будь-якому іншому можливому кліматичному режимі допустимі габаритні відстані будуть також дотримані.

Найбільша стріла провисання може спостерігатися або за малих значень механічної напруги в матеріалі проводу (режим максимальних температур), або за найбільших вертикальних механічних навантажень (режим максимальної ожеледі).

Критерієм визначення кліматичного режиму найбільшої стріли провисання, служить критична температура. Розглянемо зміну форми кривої провисання проводу в прогоні протягом року, як показано на рис. 3.22, де індексом 1 позначено положення проводу в режимі максимальної ожеледі. Із збільшенням температури повітря, під час відлиги спостерігається скидання ожеледі, провід приймає положення, позначене індексом 2. Далі, із зростанням температури повітря, стріла провисання проводу буде збільшуватися, і провід прийматиме положення, позначені індексами 3 та 4. Очевидно, що за певної температури провід прийме таке саме положення, що й за максимальної ожеледі. Таку температуру називають критичною [7, 16, 29, 34].

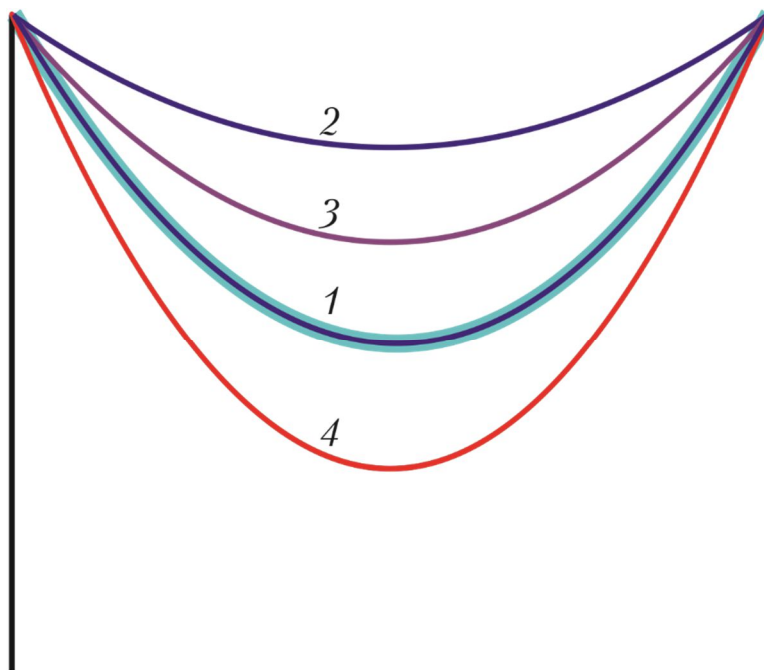


Рис. 3.22. До визначення критичної температури

Очевидно, що якщо максимальна температура перевищить критичну, то найбільша стріла провисання спостерігається саме в режимі максимальної температури. Навпаки, у разі, якщо максимальна температура не досягає критичної, то найбільша стріла провисання спостерігається в режимі максимальної ожеледі.

Умова однакових стріл провисання в режимах максимальної ожеледі та критичної температури визначає рівняння

$$\frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma_{кр}} = \frac{\gamma_3 l^2}{8\sigma_o}, \quad (3.39)$$

де σ_o , $\sigma_{кр}$ – напруження проводу в режимах максимальної ожеледі та критичної температури відповідно.

Рівняння (3.39) визначає співвідношення

$$\sigma_{кр} = \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \sigma_o. \quad (3.40)$$

Після підстановки співвідношення (3.40) в рівняння стану проводу у прогоні (3.19) отримуємо

$$\sigma_o \frac{\gamma_1}{\gamma_3} - \frac{\gamma_1^2 E l^2}{24 \sigma_o^2} \left(\frac{\gamma_3}{\gamma_1} \right)^2 = \sigma_o - \frac{\gamma_3^2 E l^2}{24 \sigma_o^2} - \alpha E (t_{кр} - t_o).$$

Звідки

$$t_{\text{кр}} = t_o + \frac{\sigma_o}{\alpha E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right). \quad (3.41)$$

Аналіз виразу (3.41) свідчить, що для проводу з визначеними параметрами, критична температура є сталою величиною і не залежить від довжини прогону.

Із зіставлення критичної температури з максимальною можна зробити такі висновки:

- 1) якщо максимальна температура більша критичної, то найбільша стріла провисання спостерігається за максимальної температури;
- 2) якщо максимальна температура нижче критичної, то найбільша стріла провисання спостерігається за максимальної ожеледі.

Зазначимо, що в оціночних розрахунках допустимо підставляти у вираз (3.41) значення допустимого напруження в режимі максимальних навантажень.

❓ **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

1. Дайте визначення критичної температури.
2. Поясніть, яким чином визначають режим максимальної стріли провисання.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 112-113; [16], с. 72-75; [29], с. 371-372; [34], с. 54-55; [63], с. 522-523.

3.7. СИСТЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Під час виконання механічних розрахунків повітряних ліній визначають три групи експлуатаційних режимів:

- 1) нормальні режими;
- 2) аварійні режими;
- 3) монтажні режими.

Нормальним називають режим повітряної лінії за необірваних проводів та тросів. В таких режимах конструктивні елементи лінії зазнають дію постійних та короткочасних навантажень відповідно до поєднання кліматичних навантажень та впливів.

Аварійним режимом називають роботу лінії за обриву проводів та (або) тросів. В таких режимах конструктивні елементи лінії зазнають аварійних навантажень, зокрема опори зазнають дію згинальних та (або) обертаючих моментів. Тривалість дії навантажень аварійного режиму відносно мала. Тому для таких навантажень встановлено менші коефіцієнти запасу,

чим для навантажень нормальних режимів. Іншими словами, навантаження аварійних режимів можуть перевищувати навантаження нормальних режимів.

Монтажним режимом називають роботу конструкцій в умовах монтажу опор, проводів та тросів лінії. Тут елементи лінії зазнають дію монтажних навантажень, зокрема опори можуть зазнавати дію згинальних та (або) обертаючих моментів, обумовлених неповним монтажем проводів та тросів лінії.

Загалом можна виявити нескінчену кількість можливих сполучень кліматичних умов. Проте в практиці аналізу механічних навантажень на конструктивні елементи повітряних ліній зазвичай розглядають розрахункові кліматичні режими, які визначаються комбінаціями кліматичних умов, зазначених в табл. 3.17 [47].

Таблиця 3.17. Сполучення кліматичних умов для розрахунків повітряних ліній

| Режим | Температура повітря | Навантаження від вітру | Навантаження від ожеледі |
|------------|---------------------|--|--------------------------|
| Нормальний | середньорічна | — | — |
| | найвища | — | — |
| | найнижча | — | — |
| | під час ожеледі | — | максимальне |
| | під час ожеледі | максимальне | — |
| | середньорічна | під час ожеледі | 90% від максимального |
| Аварійний | середньорічна | — | — |
| | найнижча | — | — |
| | під час ожеледі | — | максимальне |
| Монтажний | –15°C | натиск вітру на висоті 10 м над поверхнею землі 62,5 Па | — |

В нормальних режимах повітряних ліній розглядають наступні розрахункові кліматичні режими.

І. Експлуатаційний режим. Ожеледь і вітер відсутні, температура дорівнює середньорічній. Режим розраховують для перевірки допустимості механічного напруження проводу в довготривалому експлуатаційному режимі. У цьому режимі також здійснюють контроль захисту від вібрації проводів.

II. *Режим максимальної температури.* Вітер відсутній, температура повітря максимальна. У цьому режимі можлива максимальна стріла провисання і мінімальний габарит. Режим розраховують для контролю габариту лінії.

III. *Режим мінімальної температури.* Вітер та ожеледь відсутні, температура повітря мінімальна. Режим розраховують для визначення мінімальної стріли провисання і контролю напруження проводу, яке може досягати своїх допустимих значень. Також в цьому режимі здійснюють перевірку гірлянд ізоляторів на підсікання проводів.

IV. *Режим максимальної ожеледі.* Навантаження від ожеледі максимальне, вітер відсутній, температура повітря відповідає температурі утворення ожеледі. У цьому режимі можливе максимальне вертикальне навантаження і мінімальна габаритна відстань від проводу до землі або інженерних споруд. Даний режим розраховують для контролю габариту лінії та напруження проводу.

V. *Вітровий режим.* Навантаження від ожеледі відсутнє, навантаження від натиску вітру максимальне, температура повітря відповідає температурі найбільшої швидкості вітру (температурі утворення ожеледі). У цьому режимі можливе виникнення максимального напруження проводів та тросів. Тут здійснюють перевірку допустимості напруження проводів та тросів, а також контролюють відстані від проводів у відхиленому стані до конструктивних елементів опори.

VI. *Режим вітру під час ожеледі.* Навантаження від вітру відповідає режиму вітру під час ожеледі, навантаження від ожеледі становить 90% максимального, температура повітря відповідає температурі утворення ожеледі. У цьому режимі механічне напруження проводів та тросів може досягати свого допустимого значення. Режим розраховують з метою контролю тяжіння проводів та тросів лінії, а також для перевірки ізоляційних проміжків між металевими частинами опор та проводами лінії у відхиленому внаслідок дії вітру стані.

Під час проектування повітряних ліній можуть виконуватись механічні розрахунки для будь-яких інших кліматичних умов, обумовлених особливостями проходження траси лінії електропередавання. Так, наприклад, у разі перетинання повітряних ліній між собою нормативні документи встановлюють допустимі відстані між найближчими проводами (або проводами та тросами) за температури повітря $+15^{\circ}\text{C}$ без вітру.

У разі наближення або перетинання повітряною лінією залізниць додатково обов'язково проводять розрахунки у режимі максимальних електричних навантажень, коли температура проводу визначається не тільки кліматичними умовами в районі траси лінії, а й нагріванням проводів робочими струмами. Тут, у разі відсутності інформації про електричні навантаження повітряної лінії приймають максимально допустиму температуру проводу $+70^{\circ}$ (для традиційних сталевих проводів). Такий режим

розраховують для контролю габаритних відстаней між проводами повітряної лінії та контактною мережею та іншими елементами залізниці.

Для виконання механічного розрахунку грозозахисного тросу повітряної лінії визначають також стан проводу за температури $+15^{\circ}\text{C}$ в безвітряну погоду (див. підрозділ 3.8). Такий режим, інколи, називають режимом грозового періоду.

Систематичний розрахунок проводів та тросів виконують з метою контролю технологічних вимог до конструкцій повітряних ліній електропередавання у всіх можливих кліматичних умовах. Такий розрахунок полягає у визначенні напруження в матеріалі проводу або тросу за рівнянням стану проводу у прогоні для всіх розрахункових кліматичних режимів за виразом (3.19) та контролю неприпустимості порушення їх гранично допустимих значень. Також тут розраховують та контролюють стріли провисання проводів та тросів у розрахункових кліматичних режимах за виразом (2.29).

В задачах проектування повітряних ліній електропередавання проводять систематичні розрахунки стану проводу у прогонах різної довжини із певним кроком, наприклад, 10 м. Під час виконання таких розрахунків слід обов'язково враховувати зміну вихідного кліматичного режиму відповідно до співвідношення поточної довжини прогону із критичними.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Наведіть визначення нормального, аварійного та монтажного режимів повітряної лінії.
2. Перелічіть та охарактеризуйте розрахункові кліматичні режими.
3. У чому полягає систематичний розрахунок проводів та тросів повітряної лінії.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[31], с. 183-186; [34], с. 63-67.

3.8. РОЗРАХУНОК ГРОЗОЗАХИСНИХ ТРОСІВ

Грозозахисний трос являє собою протяжний блискавковідвід, заземлений безпосередньо або через іскрові проміжки, натягнутий вздовж повітряної лінії електропередавання над струмопровідними проводами та призначений для захисту устаткування електричної мережі від ураження блискавкою. В практиці використовують наступні способи закріплення грозозахисних тросів.

1. Трос закріплюють та заземлюють (без ізоляторів) на всіх проміжних опорах та закріплюють на ізоляторах тільки на залізобетонних та металевих анкерних опорах. Такий спосіб закріплення грозозахисного тросу застосовують в лініях електропередавання напругою до 150 кВ.

2. Трос закріплюють на всіх опорах на ізоляторах, шунтованих іскровими проміжками. На кожній анкерованій ділянці трос заземлюють в одній точці. Такий спосіб закріплення грозозахисного тросу використовують в лініях електропередавання напругою від 220 кВ.

3. Трос закріплюють на ізоляторах по всій довжині лінії, або на окремих ділянках. Ізолятори шунтовані іскровими проміжками. Такий спосіб закріплення грозозахисного тросу використовують у разі використання тросу для організації каналів високочастотного зв'язку.

Нормативні документи регламентують блискавкозахист повітряних ліній 110 кВ і вище на металевих та залізобетонних опорах за всією довжиною лінії. Лінії 35 кВ захищають тросами тільки на підходах до підстанцій на ділянках, довжиною 1-2 км. Для блискавкозахисту лінії на опорах закріплюють один або два грозозахисних троса, як показано на рис. 3.23, де α_t – кут захисту лінії. Лінії електропередавання на опорах з розташуванням проводів у два або три яруси мають бути захищені одним тросом як показано на рис. 3.23 а. За горизонтального розташування проводів лінія має бути захищена двома тросами, як показано на рис. 3.23 б.

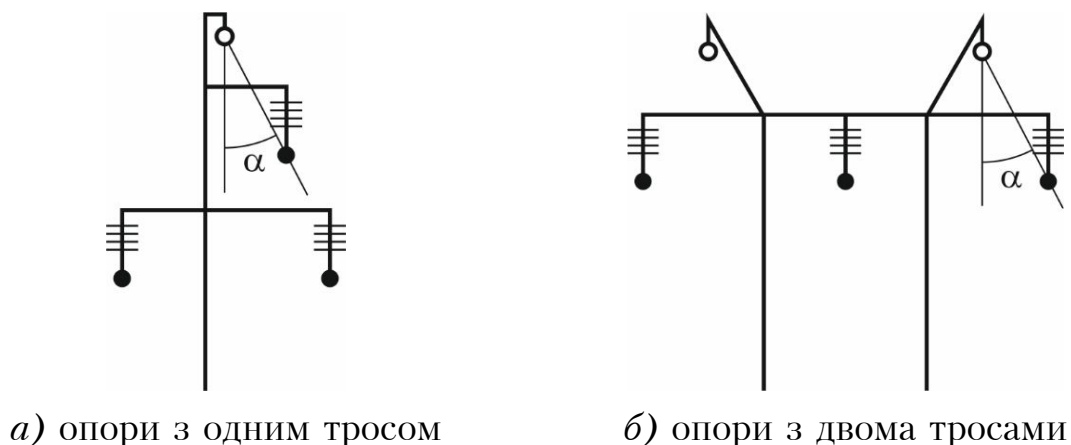


Рис. 3.23. Схеми розташування тросів на опорах

Розрахунок грозозахисного троса виконують виходячи з вимоги забезпечення захисту струмопровідних проводів від прямого влучання блискавки. Така вимога визначає допустимі найменші відстані між проводом та тросом всередині прогону повітряної лінії за різних довжин прогонів, наведені в табл. 3.18 [47]. Для проміжних значень довжин прогонів відстані між тросом і проводом визначають за допомогою інтерполяції.

Таблиця 3.18. Найменші відстані між тросом і проводом по вертикалі всередині прогону

| Довжина прогону, м | Найменша відстань між тросом і проводом, м | Довжина прогону, м | Найменша відстань між тросом і проводом, м |
|--------------------|--|--------------------|--|
| 100 | 2,0 | 700 | 11,5 |
| 150 | 3,2 | 800 | 13,0 |
| 200 | 4,0 | 900 | 14,5 |
| 300 | 5,5 | 1000 | 16,0 |
| 450 | 7,0 | 1200 | 18,0 |
| 500 | 8,5 | 1500 | 21,0 |
| 600 | 10,0 | | |

Крім того лінії електропередавання на опорах з розташуванням проводів у два або три яруси мають бути захищені одним тросом, таким чином, щоб захисний кут не перевищував 30° , за горизонтального розташування проводів лінія має бути захищена двома тросами, таким чином, щоб захисний кут не перевищував 20° .

Зазначимо, що струмопровідні проводи та грозозахисні троси по різному реагують на зміну кліматичних умов в районі траси лінії. Це обумовлено різницею фізико-механічних характеристик проводів та тросів. Зазвичай для виконання грозозахисних тросів використовують сталеві проводи та линви, а також сталюалюмінієві проводи особливо посиленої механічної міцності. Це обумовлює більші значення модулю пружності та менші значення коефіцієнту теплового здовження грозозахисних тросів порівняно із струмопровідними проводами. Таким чином, необхідно розглядати задачу визначення вихідного кліматичного режиму грозозахисного тросу, за якого відстань між проводом та тросом набуває найменшого значення. Оскільки коефіцієнт теплового здовження проводу більший, чим тросу ($18,3\text{--}23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ проти $12\text{--}15,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), у разі збільшення температури провід розтягується в більшому ступені, ніж трос і найменша відстань між тросом та проводом має місце в режимі мінімальних температур. Разом з тим слід зважати на те, що грозова активність спостерігається за температури повітря не менше $+15^\circ\text{C}$. Таким чином, нормовані найменші

відстані між проводом та тросом, наведені в табл. 3.18, визначають положення грозозахисного тросу за температури $+15^{\circ}\text{C}$ в безвітряну погоду. Такий режим і слід обрати за вихідний у розрахунках грозозахисного тросу.

Розглянемо схему розташування тросу та проводу, наведено на рис. 3.24. Тут $f_{\text{т}}$, $f_{\text{п}}$ – стріли провисання проводу та тросу відповідно; $\Delta h_{\text{т}}$ – висота закріплення тросу над проводом на опорі; $z_{\text{т}}$ – нормована відстань між тросом та проводом в середині прогону.

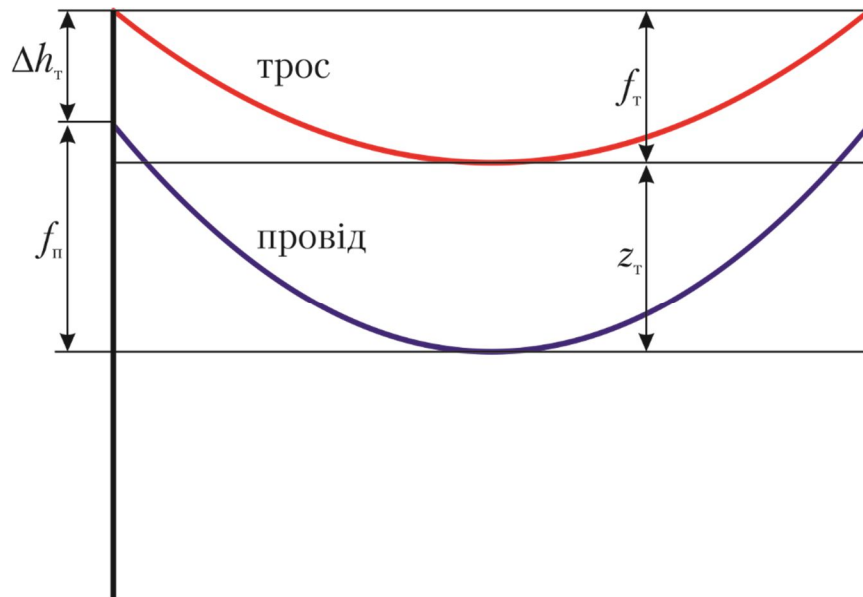


Рис. 3.24. Схема розташування проводу та грозозахисного тросу

Відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.24 справедливе співвідношення

$$f_{\text{т}} = f_{\text{п}} + \Delta h_{\text{т}} - z_{\text{т}}. \quad (3.42)$$

Якщо висоти закріплення тросів над проводами на суміжних опорах відрізняються, то до виразу (3.42) слід підставляти їх середньоарифметичне значення

$$\Delta h_{\text{т}} = 0,5(\Delta h'_{\text{т}} + \Delta h''_{\text{т}}),$$

де $\Delta h'_{\text{т}}$, $\Delta h''_{\text{т}}$ – висоти закріплення тросів над проводами на суміжних опорах.

На підставі визначеної стріли провисання у вихідному режимі грозозахисного тросу визначають відповідне напруження

$$\sigma_{+15} = \frac{\gamma_1 l^2}{8f_{\text{т}}}, \quad (3.43)$$

де γ_1 – питоме навантаження від власної ваги тросу.

Отримане за виразом (3.43) значення підставляють у рівняння стану проводу у прогоні (3.19) та реалізують систематичний розрахунок тросу для всіх кліматичних режимів з метою контролю дотримання технологічних вимог до конструктивного виконання повітряної лінії.

❓ **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ**

1. Наведіть вимоги щодо виконання грозозахисту повітряних ліній електропередавання.
2. Поясніть особливості розрахунку грозозахисних тросів повітряних ліній електропередавання.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 145-147; [34], с. 57-58.

3.9. МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ІЗОЛЯЦІЙНИХ ПІДВІСІВ

Особливість роботи лінійних ізоляторів, призначених для ізоляції струмопровідних проводів та грозозахисних тросів від металевих елементів конструкції опори, полягає в тому, що вони зазнають одночасної дії потужного електричного поля та великих механічних навантажень, що визначає прискорене «старіння» ізоляторів.

До основних технічних характеристик ізоляторів відносять:

- механічна руйнівна сила – найменше значення сили, яку слід прикласти до ізолятора для його руйнації;
- електромеханічна руйнівна сила – найменше значення сили, яку слід прикласти до ізолятора, що знаходиться під електричним потенціалом для його руйнації;
- довжина шляху витoku – найменша відстань вдовж контуру зовнішньої ізоляційної поверхні між частинами, що знаходяться під різними електричними потенціалами.

В підрозділі 3.1 було зазначено, що механічний розрахунок ізоляційних підвісів виконують за методом руйнівних навантажень, суть якого полягає у перевірці допустимості механічних навантажень, які зазнає підвіс з урахуванням встановлених коефіцієнтів запасу. В нормальних режимах повітряної лінії коефіцієнти запасу становлять 2,5 в режимі максимальних навантажень на 5,0 в експлуатаційному режимі.

В механічних розрахунках повітряних ліній електропередавання визначають наступні навантаження, які можуть зазнавати ізоляційні підвіси:

- 1) навантаження від власної ваги ізоляторів та зчеплювальної арматури;

- 2) навантаження від ваги проводів та тросів, у тому числі вкритих ожеледдю, закріплених на ізоляційному підвісі;
- 3) навантаження від натиску вітру на проводи та троси, у тому числі вкриті ожеледдю, закріплені на ізоляційному підвісі;
- 4) навантаження від натягу проводів та тросів.

Для визначення навантажень, які передаються на ізоляційний підвіс від закріплених проводів та тросів визначають поняття вагового та вітрового прогонів.

Ваговий прогін являє собою ділянку лінії, визначену відрізком проводу, вага якого передається на ізоляційний підвіс та відповідну опору. В підрозділі 2.4 показано, що вертикальна складова тяжіння проводу в точці закріплення дорівнює вазі відрізка проводу між нижньою точкою провисання та точкою закріплення на опорі. Таким чином, ваговий прогін являє собою ділянку між осями кривих провисання проводу в суміжних прогонах, як показано на рис. 3.25.

Очевидно, що ваговий прогін визначає вертикальні навантаження, які передаються на ізоляційний підвіс від ваги закріпленого проводу або тросу:

$$P_{\text{ваг}} = p_{1(3)} l_{\text{ваг}},$$

де $p_{1(3)}$ – одиничне навантаження від власної ваги проводу (p_1), або ваги проводу, вкритого ожеледдю (p_3) відповідно до умов розрахунку; $l_{\text{ваг}}$ – довжина вагового прогону.

Вітровий прогін являє собою ділянку лінії, визначену відрізком проводу, навантаження від натиску вітру на який передається на ізоляційний підвіс та відповідну опору. В підрозділі 2.7 показано, що поперечна гори-

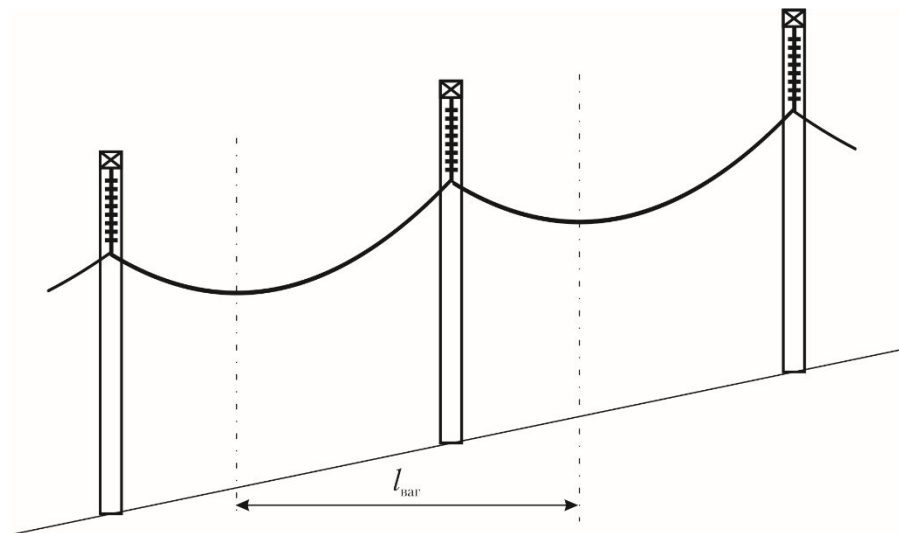


Рис. 3.25. Ваговий прогін

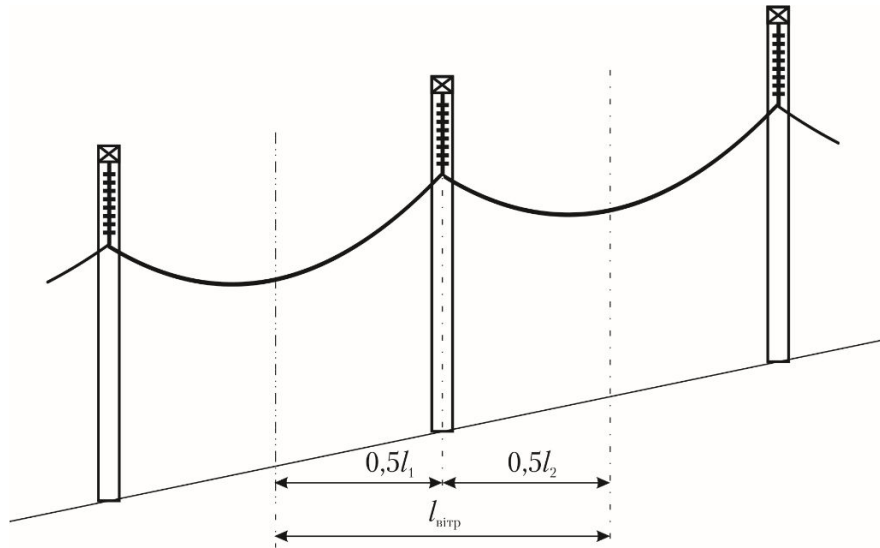


Рис. 3.26. Вітровий прогін

зонтальна складова тяжіння проводу в точці закріплення визначається натиском вітру на відрізок проводу між серединою прогону та точкою закріплення на опорі. Таким чином, вітровий прогін являє собою ділянку між серединами суміжних прогонів, як показано на рис. 3.26.

Очевидно, що вітровий прогін визначає горизонтальні навантаження, які передаються на ізоляційний підвіс від натиску вітру на закріплені проводи та троси:

$$P_{\text{вітр}} = p_{4(5)} l_{\text{вітр}},$$

де $p_{4(5)}$ – одиничне навантаження від натиску вітру проводу; $l_{\text{вітр}}$ – довжина вітрового прогону.

Сумарні навантаження, які зазнають ізоляційні підвіси визначаються наступними виразами:

- в експлуатаційному режимі

$$P_e = p_1 l_{\text{ваг}} + G_r,$$

де p_1 – одиничне навантаження від власної ваги проводу (тросу); G_r – вага ізоляційного підвісу.

- в режимі максимальної ожеледі

$$P_{m1} = p_3 l_{\text{ваг}} + G_r,$$

де p_3 – одиничне навантаження від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю.

- в режимі максимального вітру

$$P_{m2} = \sqrt{(p_1 l_{\text{ваг}} + G_r)^2 + (p_4 l_{\text{вітр}})^2},$$

де p_4 – одиничне навантаження від натиску вітру на проводи (троси).

➤ в режимі вітру під час ожеледі

$$P_{m3} = \sqrt{\left((p_1 + 0,9p_2)l_{\text{ваг}} + G_{\Gamma}\right)^2 + \left(p_5 l_{\text{вітр}}\right)^2},$$

де p_2 – одиничне навантаження від ваги відкладень ожеледі на проводах (тросах); p_5 – одиничне навантаження від натиску вітру на проводи (троси), вкриті ожеледдю.

Під час виконання механічних розрахунків ізоляторів повітряних ліній часто нехтують відхиленням ізоляційних підвісів від вертикального стану під дією вітру. Крім того для місцевості з помірною нерівністю рельєфу довжини вагового та вітрового прогонів умовно дорівнюють. В результаті отримують типовий вираз для визначення навантаження, які зазнають ізоляційні підвіси в режимі максимальних навантажень

$$P_m = p_{\max} l_{\text{ваг}} + G_{\Gamma},$$

де p_{\max} – сумарне одиничне навантаження на проводи (троси) в режимі максимальних навантажень.

Таким чином механічний розрахунок підтримуючих ізоляційних підвісів повітряних ліній полягає в контролі виконання обмежень

$$\begin{cases} 5(p_1 l_{\text{ваг}} + G_{\Gamma}) \leq R; \\ 2,5(p_{\max} l_{\text{ваг}} + G_{\Gamma}) \leq R, \end{cases} \quad (3.44)$$

де R – гарантоване руйнівне навантаження ізолятора.

Перший вираз системи (3.44) визначає умови роботи ізоляційного підвісу в експлуатаційному режимі повітряної лінії, а другий вираз – в режимі максимальних навантажень.

Для розрахунку натяжних ізоляційних підвісів додатково слід урахувати тяжіння проводу (тросу) у прогоні:

$$\begin{cases} 5\sqrt{(\sigma_e F)^2 + \left(p_1 \frac{l_{\text{ваг}}}{2} + G_{\Gamma}\right)^2} \leq R; \\ 2,5\sqrt{(\sigma_{\max} F)^2 + \left(p_{\max} \frac{l_{\text{ваг}}}{2} + G_{\Gamma}\right)^2} \leq R, \end{cases} \quad (3.45)$$

де σ_e , σ_{\max} – напруження проводу (тросу) в експлуатаційному режимі та режимі максимальних навантажень відповідно; F – розрахунковий переріз проводу (тросу).

Під час розрахунку ізоляційних підвісів слід також контролювати наближення струмопровідних проводів лінії до металевих елементів опори внаслідок відхилення ізоляторів під натиском вітру. На рис. 3.27 умовно

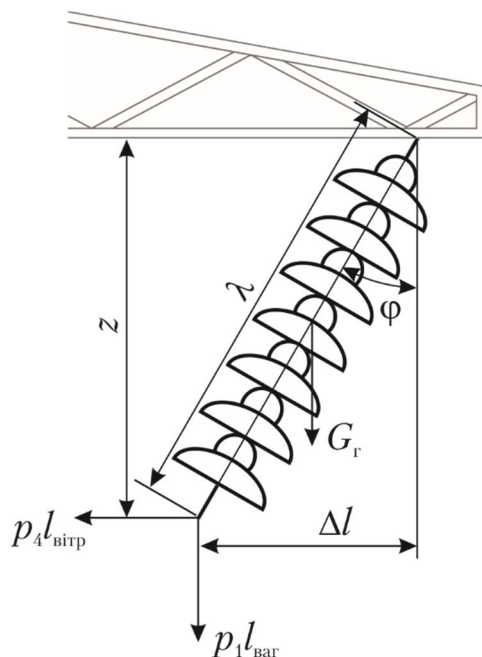


Рис. 3.27. Ізоляційний підвіс у відхиленому стані

представлено положення ізоляційного підвісу у відхиленому стані через натиск вітру у напрямку, перпендикулярному до вісі лінії. Тут λ – довжина ізоляційного підвісу; G_r – його вага; $p_1 l_{\text{ваг}}$ – вертикальне навантаження, обумовлене вагою закріпленого проводу; $p_4 l_{\text{вітр}}$ – горизонтальне навантаження, обумовлене натиском вітру на проводи; Δl – горизонтальне переміщення точки закріплення проводу; z – наближення проводу до траверси опори.

Запишемо рівняння рівноваги моментів сил, які діють на ізоляційний підвіс відносно точки його закріплення на траверсі опори

$$p_1 l_{\text{ваг}} \Delta l + G_r \frac{\Delta l}{2} - p_4 l_{\text{вітр}} z = 0,$$

або

$$(p_1 l_{\text{ваг}} + 0,5 G_r) z \operatorname{tg} \varphi = p_4 l_{\text{вітр}} z,$$

звідки

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k p_4 l_{\text{вітр}}}{p_1 l_{\text{ваг}} + 0,5 G_r}, \quad (3.46)$$

де k – коефіцієнт, який враховує коливання проводів у разі їх відхилень під дією вітру, значення якого визначають за даними табл. 3.19 відповідно до швидкісного натиску вітру в районі траси лінії.

Таблиця 3.19. Значення коефіцієнту коливання проводів

| | | | | |
|-----------------------------|--------|------|-----|------|
| Швидкісний натиск вітру, Па | до 400 | 450 | 550 | 600 |
| Коефіцієнт коливання | 1 | 0,95 | 0,9 | 0,85 |

Граничне значення кута відхилення ізоляційного підвісу обумовлене мінімально допустимою відстанню між струмопровідним проводом та траверсою опори відповідно до виразу

$$\cos \varphi_{\text{гр}} = \frac{z_{\text{min}}}{\lambda}, \quad (3.47)$$

де z_{min} – мінімально допустима відстань відповідно до даних табл. 3.20.

Таблиця 3.20. Найменші ізоляційні відстані по повітрю від струмопровідних до заземлених частин опори

| Розрахункова умова | Номинальна напруги лінії, кВ | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 10 | 20 | 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Грозові перенапруги для ізоляторів: | | | | | | | | | |
| – штирових | 15 | 25 | 35 | | | | | | |
| – підвісних | 20 | 35 | 40 | 100 | 130 | 180 | 260 | 320 | |
| Внутрішні перенапруги | 10 | 15 | 30 | 80 | 110 | 160 | 215 | 300 | 450 |
| Робоча напруга | – | 7 | 10 | 25 | 35 | 55 | 80 | 115 | 160 |

У разі, якщо в режимі максимального вітру кут відхилення ізоляційного підвісу перевищує гранично допустиме значення (3.47), використовують додатковий баласт, який закріплюють на ізоляційному підвісі. Вагу баласту визначають за виразом

$$G \geq \frac{kp_4 l_{\text{вітр}}}{\text{tg } \varphi_{\text{гр}}} - p_1 l_{\text{ваг}} - 0,5G_{\text{г}}.$$

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає особливість роботи лінійних ізоляторів?
2. Дайте визначення технічних характеристик лінійних ізоляторів.
3. У чому полягає сутність механічного розрахунку підвісних лінійних ізоляторів.
4. Дайте визначення вагового та вітрового прогонів. Які навантаження визначають ці прогони?
5. Перелічіть та охарактеризуйте навантаження, які зазнають ізоляційні підвіси повітряних ліній.
6. Наведіть критеріальні вирази механічних розрахунків підтримуючих та натяжних ізоляційних підвісів.
7. Поясніть обмеження кута відхилення ізоляційного підвісу у вітровому режимі. Які заходи слід передбачати для обмеження кута відхилення ізоляційних підвісів.

3.10. ЗАХИСТ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІД ВІБРАЦІЇ

В підрозділі 1.6 було зазначено, що для виникнення вібрації проводу необхідно, щоб частота зриву завихрень, які утворюються під час обдування проводу вітром, збігалась з однією з власних частот коливань натягнутого проводу

$$v_c = \frac{n}{2L} v_{xb} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m_0}},$$

де v_c – власна частота коливань проводу; n – кількість півхвиль у прогоні; L – довжина проводу у прогоні; $v_{xb} = \sqrt{\frac{T}{m_0}}$ – фазова швидкість поширення хвилі вздовж проводу; T – тяжіння проводу; m_0 – погонна маса проводу.

Відомо, що параметри нестационарних режимів в рідинах та газах пов'язані між собою безрозмірним числом Струхаля, значення якого в аеродинаміці проводів повітряної лінії є майже сталим числом, яке приблизно дорівнює 0,2:

$$S_t = \frac{d \cdot v}{v} \approx 0,2, \quad (3.48)$$

де d – діаметр проводу; v – швидкість потоку повітря (швидкість вітру).

З виразу (3.48) випливає, що частота коливань проводу дорівнює

$$v = \frac{S_t v \cdot 10^3}{d} = \frac{200v}{d}. \quad (3.49)$$

У виразі (3.49) діаметр проводу виражений у міліметрах, а швидкість вітру – у метрах на секунду.

Довжина півхвиль коливань проводу при цьому становить

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v_{xb}}{2v} = \frac{d \cdot 10^{-3}}{2S_t v} \sqrt{\frac{T}{m_0}} = \frac{d}{400v} \sqrt{\frac{T}{m_0}}. \quad (3.50)$$

Чинні нормативні документи регламентують застосування заходів щодо захисту від вібрації проводів та тросів повітряних ліній із натяжними та підтримуючими ізоляційними підвісами [47]:

- одиночних проводів і тросів за довжин прогонів та механічних напружень за середньорічної температури, які перевищують значення, вказані в табл. 3.21 і 3.22;
- проводів розщепленої фази та розщеплених тросів з двох складників за довжини прогонів понад 150 м і механічних напружень, які перевищують значення, вказані в табл. 3.23 (проводи розщепленої

фази з трьох і більше складників захисту від вібрації не потребують, крім прогонів довжиною понад 700 м);

- одиночних проводів, проводів розщепленої фази за будь-якої кількості складників і розщеплених тросів на великих переходах водних просторів та гірських долин в прогонах довжиною більше 500 м за будь-яких значень напруження проводу;
- самоутримних проводів повітряних ліній із захищеними проводами, якщо напруження проводу за середньорічної температури перевищує 40 МПа.

Таблиця 3.21. Найменші довжини прогонів, за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Переріз, мм ² | Прогони, довжиною більше, м, у місцевості типу | |
|---|--------------------------|--|---------|
| | | I, II | III, IV |
| Сталеалюмінієві, з термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осередком і без нього, захищені проводи | 35–95 | 80 | 95 |
| | 120–240 | 100 | 120 |
| | 300 і більше | 120 | 145 |
| Алюмінієві та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | 50–95 | 60 | 95 |
| | 120–240 | 100 | 120 |
| | 300 і більше | 120 | 145 |
| Сталеві | 25 і більше | 120 | 145 |

Таблиця 3.22. Найменші механічні напруження проводів і тросів за середньорічної температури за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Механічні напруження, МПа, у місцевості типу | |
|---|--|---------|
| | I, II | III, IV |
| Сталеалюмінієві з відношенням площ поперечного перерізу А:С | | |
| 0,65–0,95 | 70 | 85 |
| 1,46 | 60 | 70 |
| 4,29–4,39 | 45 | 55 |
| 6,0–8,05 | 40 | 45 |
| 11,5 і більше | 35 | 40 |
| Алюмінієві та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | 35 | 40 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву | 40 | 45 |
| Сталеві | 170 | 195 |

Таблиця 3.23. Найменші напруження розщеплених проводів і тросів за середньорічної температури за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Механічні напруження, МПа, у місцевості типу | |
|---|--|---------|
| | I, II | III, IV |
| Сталеалюмінієві з відношенням площ поперечного перерізу А:С | | |
| 0,65–0,95 | 75 | 85 |
| 1,46 | 65 | 70 |
| 4,29–4,39 | 50 | 55 |
| 6,0–8,05 | 45 | 50 |
| 11,5 і більше | 40 | 45 |
| Алюмінієві та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | 40 | 45 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву | 45 | 50 |
| Сталеві | 195 | 215 |

Для захисту від вібрації алюмінієвих проводів та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву перерізом до 95 мм² та сталеалюмінієвих проводів та з термообробленого алюмінієвого сплаву перерізом алюмінієвої частини до 70 мм² а також сталеві троси перерізом до 35 мм² слід застосовувати гасники вібрації петльового типу, конструкція яких представлена на рис. 3.28. Такі віброгасники встановлюють під проводом у місцях його закріплення на проміжних опорах симетрично відносно підтримуючого затискача.

Розміри петльового гасника вібрації визначають відповідно до марки проводу за даними табл. 3.24.

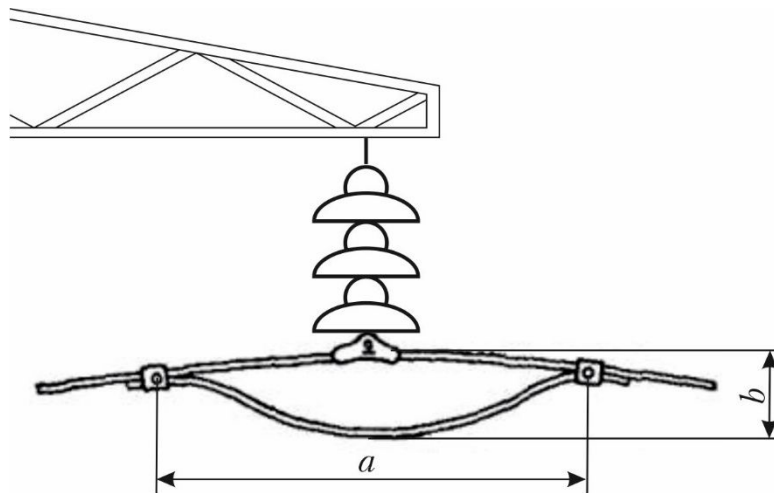
Таблиця 3.24. Геометричні розміри гасників вібрації петльового типу

| Марка проводу | Розміри гасника, м | |
|--|--------------------|----------|
| | <i>a</i> | <i>b</i> |
| АН35, АН50, А35, А50, АС25, АС35, АЖ25, АЖ35, С25, С35 | 1,0 | 0,15 |
| А70, АН70, АС50, АЖ50 | 1,15 | 0,15 |
| А95, АН95, АЖ70 | 1,35 | 0,5 |

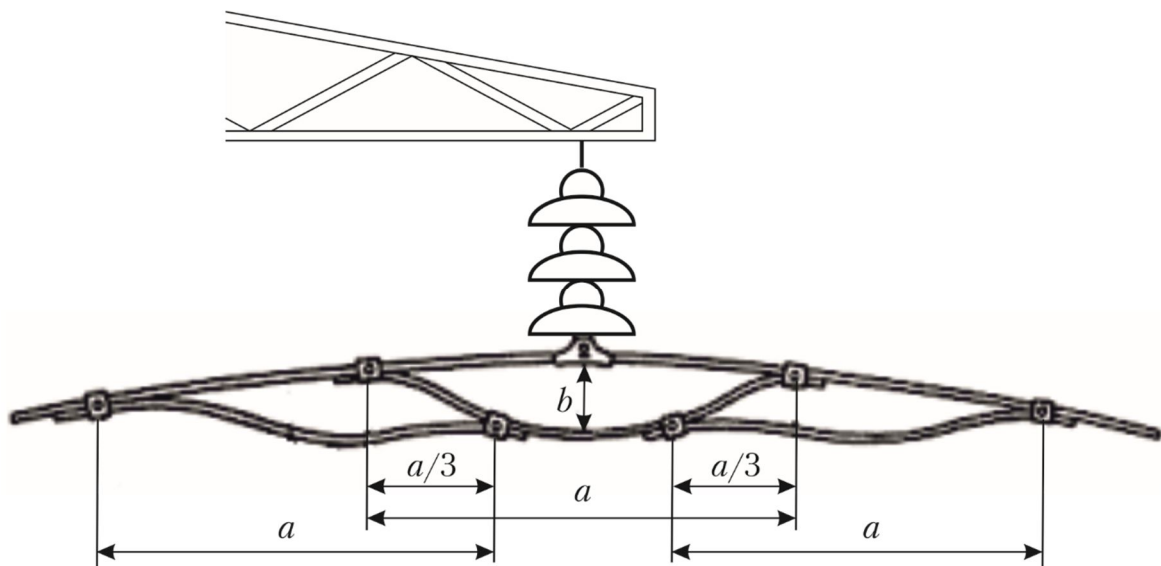
Геометричні розміри гасників вібрації для інших проводів, не представлених в табл. 3.24, можна визначити за виразами:

$$a = d \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{T_e}{m_0}}; \quad b = (0,1 \dots 0,15) a,$$

де d – діаметр проводу, мм; T_e – тяжіння проводу в експлуатаційному режимі, Н; m_0 – погонна маса проводу, кг/м.



а) однопетльовий



б) трипетльовий

Рис. 3.28. Гасник вібрації петльового типу

Для захисту від вібрації алюмінієвих проводів перерізом 120 мм^2 та більше, сталюалюмінієвих перерізом 95 мм^2 та більше а також сталевих тросів перерізом 50 мм^2 та більше слід застосовувати гасники вібрації Стокбріджа, зовнішній вигляд яких представлено, наприклад, на рис. 1.55 б. Гасники вібрації Стокбріджа встановлюють з обох боків прогону таким чином, щоб у всіх діапазонах небезпечних частот вібрації гасники не були розташовані у вузлових точках коливань. За певних обставин допустимо встановлення гасників вібрації тільки з одного боку прогону.

У разі встановлення одного гасника на прогін, відстань від середини підтримуючого або від краю натяжного затискача слід визначати за виразом

$$S = 0,9 \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad (3.51)$$

де λ_{\min} – найменша можлива довжина хвилі під час коливань.

З виразу (3.50) випливає, що найменша довжина хвилі спостерігається за найбільшої можливої швидкості вітру, тобто 7 м/с (див. табл. 1.6)ю Таким чином, вираз (3.51) можна подати у вигляді

$$S = 0,9 \frac{\lambda_{\min}}{2} = 0,9 \frac{d}{400v_{\max}} \sqrt{\frac{T_e}{m_0}} \approx 3,2 \cdot 10^{-4} d \sqrt{\frac{T_e}{m_0}},$$

де d – діаметр проводу, мм; T_e – тяжіння проводу в експлуатаційному режимі, Н; m_0 – погонна маса проводу, кг/м. Обчислене значення слід округлити до найближчого кратного 5 см.

У разі встановлення двох гасників вібрації біля підтримуючого ізоляційного підвісу

$$S_1 = 0,9 \frac{\lambda_{\min}}{2} = 3,2 \cdot 10^{-4} d \sqrt{\frac{T_e}{m_0}};$$

$$S_2 = 1,1 \frac{\lambda_{\min}}{2} = 3,9 \cdot 10^{-4} d \sqrt{\frac{T_e}{m_0}}.$$

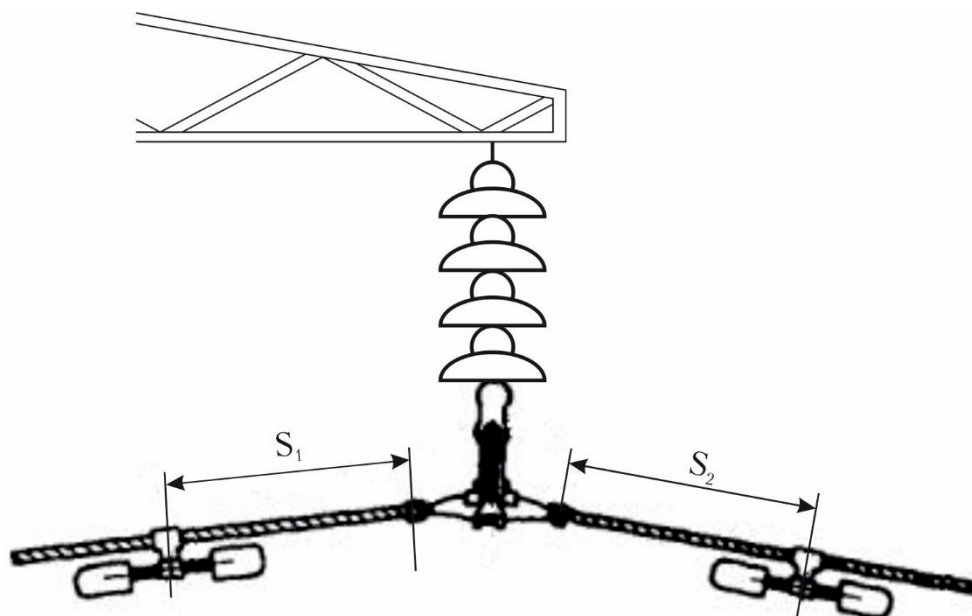


Рис. 3.29. Розташування гасників вібрації біля підтримуючого ізоляційного підвісу

Для захисту від вібрації самоутримних ізольованих проводів повітряних ліній із захищеними проводами використовують гасники вібрації спірального типу, які встановлюють в місцях кріплення проводів до ізоляторів, як показано на рис. 3.30.



Рис. 3.30. Захист від вібрації повітряних ліній із захищеними проводами

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. *За яких умов необхідно застосовувати захист від вібрації проводів повітряних ліній?*
2. *Перелічіть типи віброгасників неізольованих проводів повітряних ліній. Вкажіть їх області застосування.*
3. *Яким чином розташовують на проводах гасники вібрації Стокбріджа?*
4. *Яким чином захищають від вібрації самоутримні ізольовані проводи?*

3.11. НАВАНТАЖЕННЯ НА ОПОРИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Опори повітряних ліній являють собою просторові конструкції, реакція яких на навантаження визначається не тільки їх інтенсивністю, але й місцем прикладення та напрямом дії навантаження. За напрямом дії навантаження на конструктивні елементи опор поділяють на вертикальні та горизонтальні. До вертикальних навантажень відносять

- 1) навантаження від власної ваги опори;
- 2) навантаження від ваги ізоляторів та лінійної арматури;
- 3) навантаження від ваги проводів та тросів;
- 4) монтажні навантаження.

До горизонтальних навантажень відносять

- 1) вітрове навантаження на конструкцію опори;
- 2) вітрове навантаження на проводи та троси;

3) навантаження від натягу проводів та тросів.

Навантаження від власної ваги опори визначають за фактичною вагою відповідно до робочих креслень опори. Навантаження від ваги ізоляторів та лінійної арматури визначають за каталожними даними. Навантаження від ваги проводів та тросів визначають за виразом

$$G = p_{1(3)} l_{\text{ваг}},$$

де $p_{1(3)}$ – одиничне навантаження від власної ваги проводу (тросу) або від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю відповідно до умов розрахунку; $l_{\text{ваг}}$ – довжина вагового прогону.

Монтажні навантаження визначають відповідно до прийнятого способу монтажу повітряної лінії. Нормативні навантаження монтажних пристосувань та монтера з інструментом складає: для опор лінії із штировими ізоляторами – 1 кН; для поміжних опор ліній напругою 35-330 кВ з підвісними ізоляторами – 1,5 кН; для анкерних опор – 2 кН; для всіх опор ліній з номінальною напругою 500 та 750 кВ – 2,5 кН.

Вітрові навантаження на конструкцію опори визначають за виразом

$$P = C_x q S \beta,$$

де C_x – аеродинамічний коефіцієнт (коефіцієнт лобового опору); q – швидкісний натиск вітру; S – площа проекції конструкції опори або її частини на площину, перпендикулярну напрямку вітру; β – коефіцієнт нерівномірності поривів вітру за висотою опори.

Вітрові навантаження на проводи та троси, закріплені на опорі визначають за виразом

$$P = p_{4(5)} l_{\text{вітр}} \operatorname{tg} \varphi,$$

де $p_{4(5)}$ – одиничне навантаження від швидкісного натиску вітру за максимального вітру або за вітру під час ожеледі відповідно до умов розрахунку; $l_{\text{вітр}}$ – довжина фактичного вітрового прогону; φ – кут атаки вітру – кут між напрямом вітру та віссю траси лінії електропередавання.

Навантаження від натягу проводів та тросів на опори повітряної лінії визначають за виразом

$$T = \sigma F,$$

де σ – механічне напруження в матеріалі проводу (тросу) за поточних кліматичних умов; F – розрахунковий переріз проводу (тросу).

Очевидно, що перелічені навантаження на опори повітряної лінії можна поділити на постійні та змінні. До постійних слід віднести навантаження від власної ваги опор, ізоляційних підвісів, проводів, тросів та лінійної арматури. До постійних відносять також навантаження від тяжіння проводу та тросу в експлуатаційному режимі за середньорічної температури та відсутності вітру та ожеледі. Всі інші навантаження є змінними та

короткочасними. До короткочасних відносять навантаження від ваги ожеледі на проводах та тросах лінії, натиску вітру на конструктивні елементи опори, проводи та троси. До змінних відносять також навантаження від тяжіння проводу або тросу понад значень за середньорічної температури.

Всі опори ліній електропередавання розраховують на навантаження нормальних, аварійних та монтажних режимів повітряної лінії. Такі розрахунки виконують для сполучень кліматичних умов, наведених в табл. 3.17.

Нормальні режими опор всіх типів розраховують за наступних сполучень кліматичних умов [34, 47]:

- 1) вітер та ожеледь відсутні, температура мінімальна (режим мінімальної температури);
- 2) вітер відсутній, ожеледь максимальна, температура відповідає максимальній ожеледі (режим максимальної ожеледі);
- 3) вітер максимальний, ожеледь відсутня, температура відповідає максимальному вітру (режим максимального вітру);
- 4) вітер максимальний під час ожеледі, навантаження від ваги відкладень ожеледі складає 90% максимального, температура відповідає максимальній ожеледі (режим вітру під час ожеледі).

Під час розрахунку анкерних опор в нормальних режимах необхідно враховувати різницю натягу проводів і тросів через неоднаковість зведених прогонів суміжних анкерованих ділянок. Кінцеві опори слід розраховувати на односторонній натяг проводів та тросів.

Розрахункові схеми проміжних та анкерних опор в нормальних режимах представлені на рис. 3.31 [34], де $G_{\text{п}}$, $G_{\text{т}}$, $G_{\text{г}}$ – навантаження від ваги проводу, тросу та ізоляційного підвісу відповідно; $Q_{\text{п}}$, $Q_{\text{т}}$ – навантаження від натиску вітру на проводи та троси відповідно; $\Delta T_{\text{п}}$, $\Delta T_{\text{т}}$ – різниця тяжіння проводів та тросів на анкерній опорі відповідно.

Проміжні опори з підтримувальними ізоляційними підвісами розраховують на горизонтальні навантаження в аварійних режимах за середньорічної температури без вітру та ожеледі за таких умов:

- 1) обірвано провід або проводи однієї фази (за будь-якої кількості проводів на опорі), троси не обірвано;
- 2) обірвано один трос, проводи не обірвано.

Аварійні навантаження прикладають в місцях закріплення проводу або тросу, у разі обриву якого зусилля в елементах обори є найбільшими.

Опори анкерного типу розраховують в аварійному режимі на обрив проводів та тросів, у разі обриву яких виникають найбільші зусилля в елементах опори, за наступними умовами:

- 1) для опор повітряних ліній з алюмінієвими проводами всіх перерізів, сталевими проводами ПС і ПМС усіх перерізів та сталюалюмінієвих проводів перерізом до 150 мм²

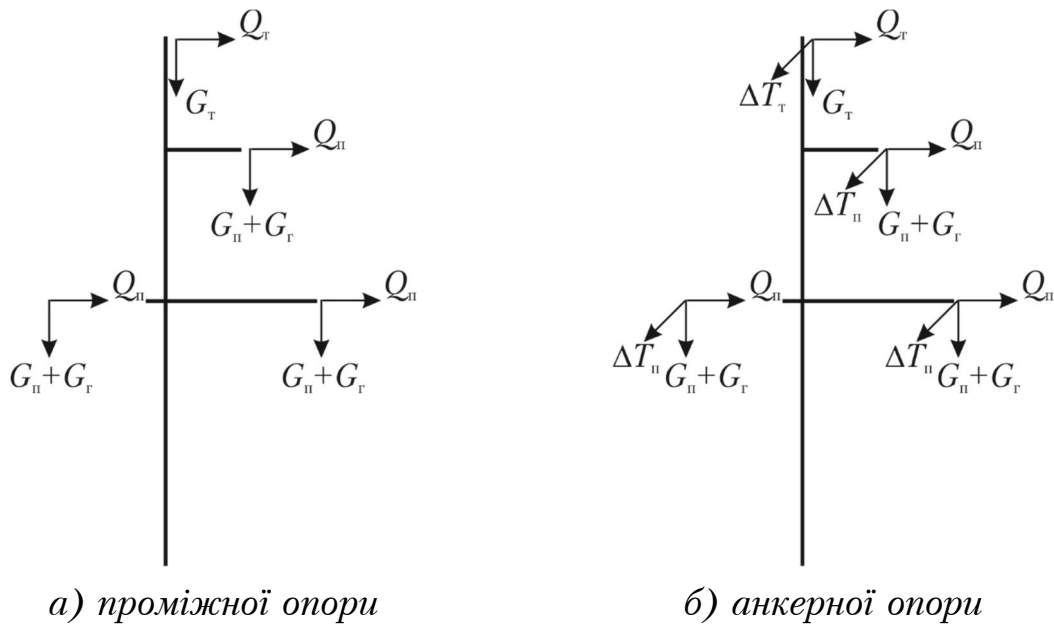


Рис. 3.31. Розрахункові схеми опор повітряної лінії в нормальних режимах

- а) обірвано проводи двох фаз одного прогону за будь-якої кількості кіл на опорі, троси не обірвано (анкерні нормальні опори);
- б) обірвано провід однієї фази одного прогону за будь-якої кількості кіл на опорі, троси не обірвано (анкерні полегшені опори);
- 2) для опор повітряних ліній зі сталевими проводами перерізом 185 мм² та більше, а також зі сталевими лінвами типу ТК усіх перерізів, які використовують як проводи, обірвано проводи однієї фази одного прогону за будь-якої кількості кіл на опорі, троси не обірвано.
- 3) Для анкерних опор незалежно від марок і перерізів закріплених проводів обірвано один трос в одному прогоні, проводи не обірвано (для розщеплених тросів обірвано всі його складники).

Аварійні режими анкерних опор розраховують за даними навантажень режиму максимального натягу проводів – режиму максимальної ожеледі без вітру або режиму мінімальних температур.

Розрахункові схеми проміжних та анкерних опор в аварійних режимах представлено на рис. 3.32.

Опори анкерного типу перевіряють за таких монтажних умов:

- 1) в одному з прогонів одноколових опор змонтовано всі проводи та троси, в іншому прогоні проводи та троси не змонтовано;
- 2) в одному з прогонів багатоколових опор послідовно та в будь-якому порядку монтують проводи одного кола, троси не змонтовано;
- 3) в одному з прогонів за будь-якої кількості тросів на опорі послідовно та в будь-якому порядку монтують троси, проводи не змонтовано.

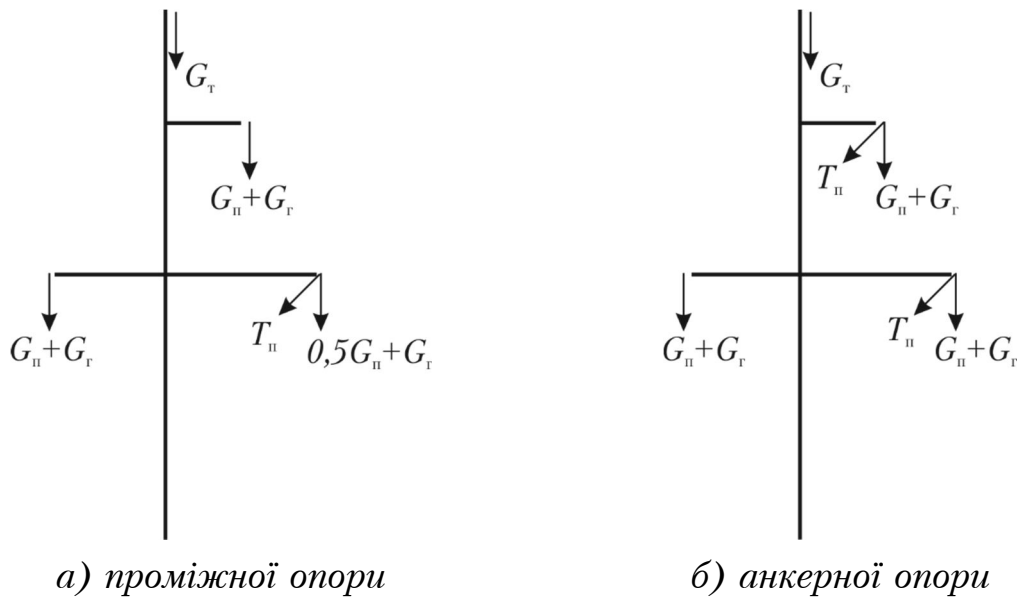


Рис. 3.32. Розрахункові схеми опор повітряної лінії в аварійних режимах

- 4) Розрахунок монтажних режимів виконують за температури -15°C та швидкісного натиску вітру $62,5 \text{ Па}$ на висоті 10 м над поверхнею землі. Натяг змонтованих проводів умовно приймають таким, що дорівнює $2/3$ максимального. Послідовність монтажу проводів та тросів обирають таку, за якої опора зазнає дію найбільших згинальних та (або) обертаючих моментів.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Перелічіть та охарактеризуйте вертикальні та горизонтальні навантаження на опори повітряної лінії.
2. Наведіть розрахункові вирази та поясніть методику визначення вертикальних та горизонтальних навантажень на опори.
3. Поясніть поділення навантажень на опори на постійні та змінні. Поясніть короткочасність змінних навантажень.
4. Перелічіть та охарактеризуйте режими повітряних ліній, за якими визначають навантаження на опори.
5. Наведіть та охарактеризуйте розрахункові схеми опор в нормальних, аварійних та монтажних режимах.

АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

4.1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Аварійним режимом повітряної лінії електропередавання називають режим, обумовлений обривом одного або декількох фазних проводів або грозозахисних тросів [47]. Такі аварії призводять до того, що проводи та троси вцілілих прогонів зазнають однобічного тяжіння. Це викликає два явища, які спостерігаються в конструктивних елементах повітряних ліній.

1. Через однобічне тяжіння проводів та тросів порушуються умови рівноваги сил, які діють на конструктивні елементи опор повітряних ліній. Це призводить до виникнення згинаючих моментів.

2. Через однобічне тяжіння проводів та тросів спостерігається відхилення гірлянд ізоляторів у бік вцілілих прогонів. Це призводить до зменшення довжин прогонів та механічного напруження в матеріалі проводів та тросів, збільшення стріл провисання та зменшення габаритних відстаней між проводом та землею або інженерною спорудою.

Зазначимо, що чинні нормативні документи, зокрема [47], регламентують найменші допустимі відстані по вертикалі між проводами лінії та поверхнею землі та проводами ліній зв'язку у разі обриву проводу у суміжному прогоні, представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Нормовані габаритні відстані в аварійних режимах повітряних ліній електропередавання, м

| Характеристика місцевості | Номинальна напруга лінії, кВ | | | | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Населена | | | | | | | |
| – до поверхні землі | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | – | – | – |
| – до проводів ЛЗ | 1 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3,5 | – |

Очевидно, що обидва розглянуті явища обумовлюють *редукцію* – зміну тяжіння проводу через переміщення у просторі точок закріплення [7, 34]. У першому разі це пов'язане із деформацією опор через дію згинаючих або обертових моментів, а у другому – із відхиленням ізоляційних підвісів від вертикального положення.

Коефіцієнт, який дорівнює відношенню редукованого тяжіння до тяжіння в нормальному доаварійному режимі називають *коефіцієнтом редукції*.

Очевидно, що в аварійних режимах редуковане тяжіння завжди менше тяжіння в доаварійному режимі, тобто коефіцієнт редукції в аварійних режимах завжди менший за одиницю.

Зазначимо, що величину редукованого тяжіння та коефіцієнт редукції визначають два фактори.

1. Довжина прогону. Чим більшою є довжина прогону, тим менша відносна зміна довжини прогону внаслідок редукції, наприклад, через відхилення ізоляційного підвісу. Це означає, що за інших однакових умов, чим більшою є довжина прогону, тим більшими є редуковане тяжіння та коефіцієнт редукції.

2. Довжина ізоляційного підвісу. Чим більшою є довжина ізоляційного підвісу, тим більша можлива зміна довжини прогону внаслідок її відхилення. Це означає, що за інших однакових умов, чим більшою є довжина ізоляційного підвісу, тим меншими є редуковане тяжіння та коефіцієнт редукції.

Розглянемо редукцію, обумовлену вигином опори повітряної лінії. Для гнучких опор переміщення точок закріплення проводів умовно представлено на рис. 4.1 та визначається виразом

$$\delta = km\Delta H,$$

де k – коефіцієнт гнучкості опори; m – коефіцієнт, який визначає розподіл зусиль між стійками опор порталного типу; ΔH – зміна тяжіння в точці закріплення проводу внаслідок редукції.

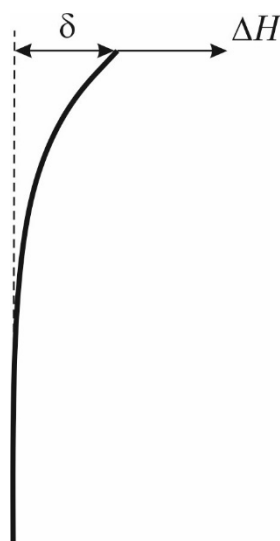


Рис. 4.1. Ілюстрація вигину опори в аварійному режимі лінії

Коефіцієнт гнучкості визначається матеріалом та конструктивним виконанням опор. Так для залізобетонних опор коефіцієнт гнучкості дорівнює 10^{-4} м/Н. Це означає, що зміна тяжіння на 10 Н приводить до відхилення опори на 1 мм. Для дерев'яних опор коефіцієнт гнучкості лежить в межах $10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-4}$ м/Н, а для металевих решітчастих опор – в межах $10^{-6} \dots 10^{-5}$ м/Н. Коефіцієнт розподілу зусиль між стійками П-подібних опор набуває таких значень: 1,0 – у разі обриву крайнього проводу для опор без вітрових зв'язків; 0,75 – те саме, але для опор із вітровими зв'язками; 0,5 – у разі обриву середнього проводу. Малі значення коефіцієнтів гнучкості опор повітряних ліній дозволяють нехтувати явищем вигину опор у розрахунках редукованих тяжінь в аварійних режимах повітряних ліній.

Для визначення залежності тяжіння в матеріалі проводу від переміщення однієї з точок його закріплення, розглянемо провід, представлений на рис. 4.2. Провід закріплено в двох точках A та B , розташованих на однаковій висоті над землею. В точці A провід закріплено жорстко, а точку B можна вільно рухати ліворуч (в положення B'), або праворуч (в положення B''). Параметри проводу у початковому положенні точки B з довжиною прогону l позначено індексом «0»: довжина проводу L_0 , тяжіння H_0 , одиничне навантаження p_0 . Далі розглянемо редукований режим, пов'язаний із скороченням довжини прогону через переміщення точки B в позицію B' . Довжина прогону тут дорівнює $l - \Delta l$, довжина проводу – L , редуковане тяжіння – H , одиничне навантаження – p_0 . Звернемо увагу та фіксоване значення одиничного навантаження в початковому та редукованому режимах.

Відповідно до виразу (2.43) довжина прогону в початковому стані дорівнює

$$L_0 = l + \frac{p_0^2 l^3}{24 H_0^2},$$

а у кінцевому –

$$L = l - \Delta l + \frac{p_0^2}{24 H^2} (l - \Delta l)^3 = l - \Delta l + \frac{p_0^2 l^3}{24 H^2} \left(1 - \frac{\Delta l}{l}\right)^3. \quad (4.1)$$

Якщо у виразі (4.1) знехтувати відношенням $\frac{\Delta l}{l}$, яке набагато менше за одиницю, рівняння (4.1) спрощується

$$L = l - \Delta l + \frac{p_0^2 l^3}{24 H^2}.$$

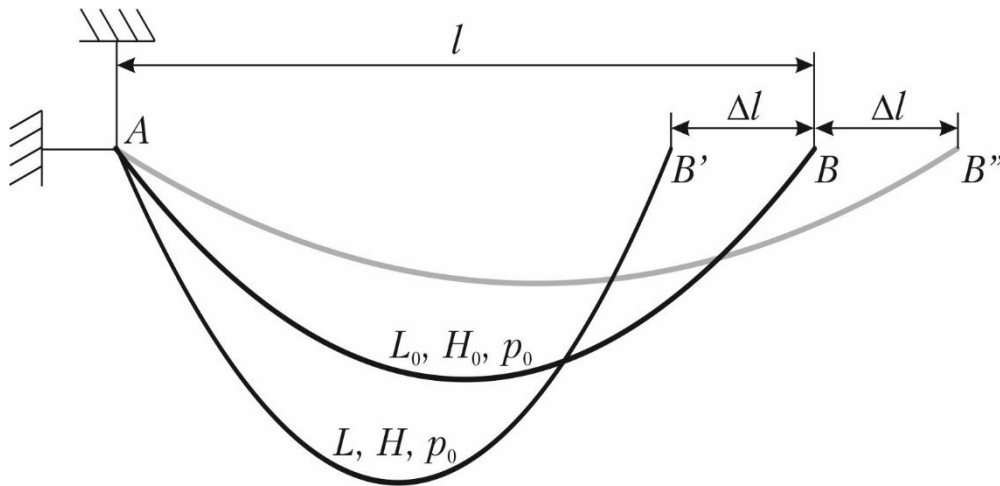


Рис. 4.2. Горизонтальне переміщення однієї з точок закріплення проводу

Зміна довжини проводу внаслідок редукції дорівнює¹

$$\Delta L = L_0 - L = \Delta l + \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right). \quad (4.2)$$

З іншого боку, зміну довжини проводу можна подати як результат пружної деформації проводу відповідно до закону Гука

$$\Delta L = \frac{1}{EF} (H_0 - H), \quad (4.3)$$

де E – модуль пружності; F – площа поперечного перерізу проводу.

Якщо дорівняти між собою вирази (4.2) та (4.3), отримуємо

$$\Delta l + \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{1}{EF} (H_0 - H),$$

або

$$\Delta l = \frac{1}{EF} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right). \quad (4.4)$$

Відповідно до нормативних сполучень кліматичних умов для розрахунків повтряних ліній (див. табл. 3.3) аварійні режими розраховують для

¹ Звернемо увагу на те, що в підрозділі 3.3 зміну довжини проводу визначено як різницю довжини проводу в поточному та вихідному режимах повітряної лінії (див. вираз (3.15)), тобто виходячи із здовження проводу в прогоні. Натомість, вираз (4.1) сформувано виходячи із скорочення довжини проводу внаслідок редукції в аварійному режимі лінії.

режимів мінімальних температур, максимальних навантажень та експлуатаційного. Параметри цих режимів слід використовувати як вихідні для розв'язання задач аналізу аварійних режимів ліній.

Отримане рівняння (4.4) визначає залежність горизонтального переміщення точки закріплення проводу від редукованого тяжіння. Зазначимо, що вираз (4.4) містить два невідомі параметри – горизонтальне переміщення точки закріплення проводу та редуковане тяжіння, що обумовлює неможливість безпосереднього використання виразу (4.4) для аналізу аварійних режимів повітряних ліній.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Дайте визначення аварійного режиму повітряної лінії електропередавання.
2. Перелічіть та охарактеризуйте явища, які мають місце в аварійних режимах повітряних ліній.
3. У чому полягає зміст розрахунку аварійного режиму повітряних ліній електропередавання.
4. Дайте визначення коефіцієнту редукації.
5. Поясніть залежність редукованого тяжіння від довжини прогону.
6. Поясніть залежність редукованого тяжіння від довжини ізоляційного підвісу.
7. Поясніть можливість нехтування вигином опор в аварійних режимах повітряних ліній під час розрахунку редукованого тяжіння.
8. Наведіть вираз, який визначає залежність горизонтального переміщення точки закріплення проводу від редукованого тяжіння.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 147-153; [16], с. 145-154; [34], с. 89-91.

4.2. РОЗРАХУНОК АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ ЛІНІЇ У РАЗІ ОБРИВУ ПРОВОДУ У ДРУГОМУ ПРОГОНІ ВІД АНКЕРНОЇ ОПОРИ

Рівняння (4.4) не дозволяє безпосередньо розрахувати редуковане тяжіння проводу в аварійних режимах повітряних ліній, оскільки містить ще один невідомий параметр – горизонтальне переміщення точки закріплення проводу, тобто скорочення довжини прогону в аварійному режимі лінії. Такий параметр можна визначити виходячи із схеми закріплення вцілілого проводу та ізоляційних підвісів на опорі. На рис. 4.3 наведено умовну

схему анкерованої ділянки, в якій відбувся обрив фазного проводу у другому прогоні, рахуючи від анкерної опори №1, тобто на ділянці між опорами №2 та №3.

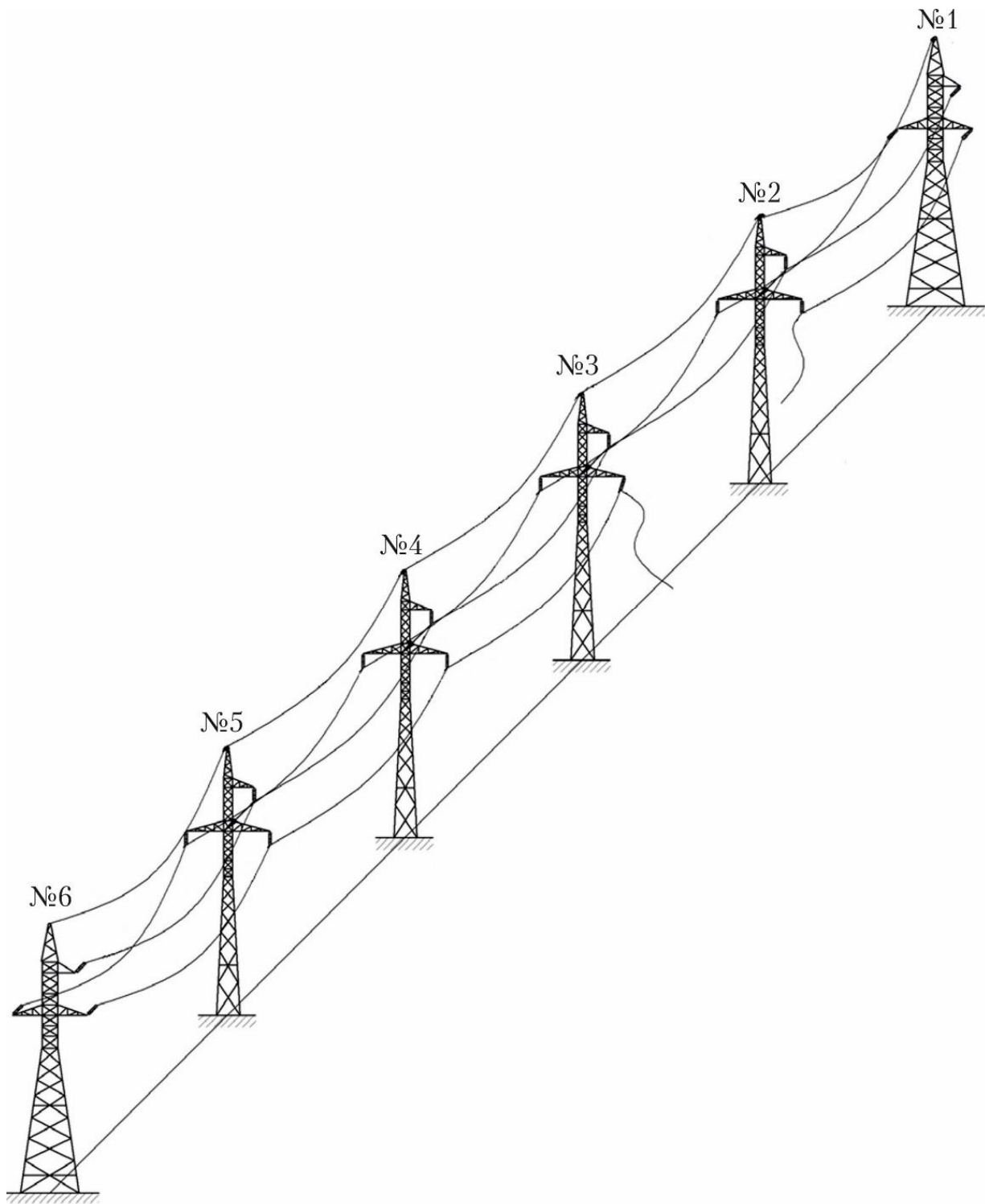


Рис. 4.3. Схема аварії на анкерованій ділянці повітряної лінії

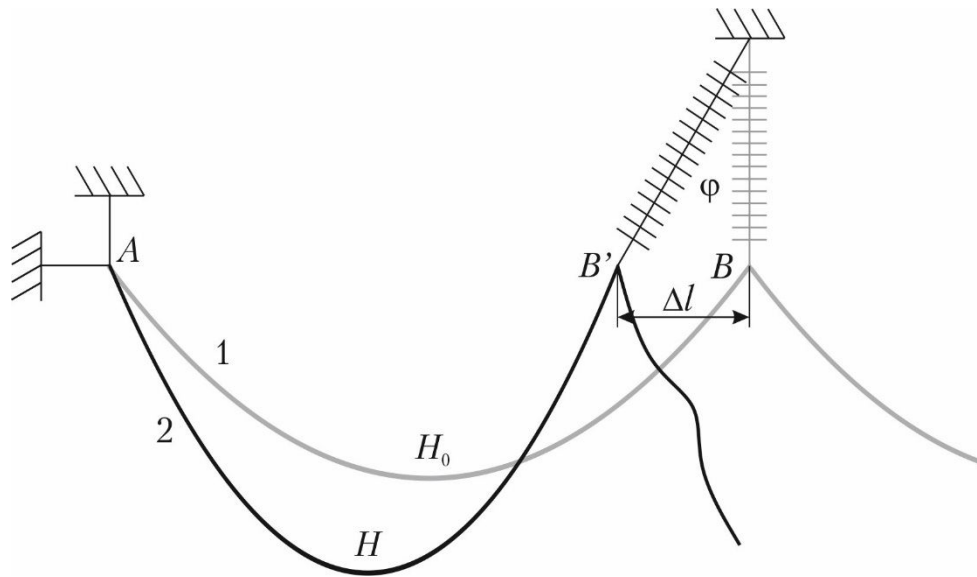


Рис. 4.4. Обрив проводу у другому прогоні від анкерної опори

Розглянемо найпростіший випадок розрахунку редукованого тяжіння у прогоні, суміжному з анкерною опорою у разі обриву проводу у другому прогоні. Для схеми на рис. 4.3 це відповідає задачі розрахунку редукованого тяжіння на ділянці між опорами №1 та №2. Розрахункова схема для такого розрахунку наведена на рис. 4.4.

В нормальному доаварійному режимі підтримуючий ізоляційний підвіс знаходиться у вертикальному стані і провід займає положення, представлене лінією 1. Після обриву проводу ізоляційний підвіс відхиляється від вертикального стану на кут φ , а провід займає положення, представлене лінією 2. При цьому довжина прогону скорочується на величину, яка визначається горизонтальною проекцією ізоляційного підвісу у відхиленому стані. Таким чином, редукція у цьому разі відбувається тільки через відхилення підтримуючого ізоляційного підвісу на опорі №2 від вертикального стану.

Розглянемо зрівноважений ізоляційний підвіс у відхиленому стані, як показано на рис. 4.5, де λ – довжина підвісу; φ – кут відхилення ізоляційного підвісу від вертикального стану; Δl – горизонтальна проекція підвісу у відхиленому стані; G_r – вага ізоляційного підвісу, прикладена до центру мас, тобто посередині підвісу; H – редуковане тяжіння вцілого проводу; $\frac{p_0 l}{2}$ – половина ваги проводу вцілого прогону, навантаження якого припадає на опору.

Запишемо рівняння рівноваги моментів сил відносно точки закріплення ізоляційного підвісу

$$\sum M = -H\sqrt{\lambda^2 - \Delta l^2} + \frac{p_0 l}{2} \Delta l + G_r \frac{\Delta l}{2} = 0,$$

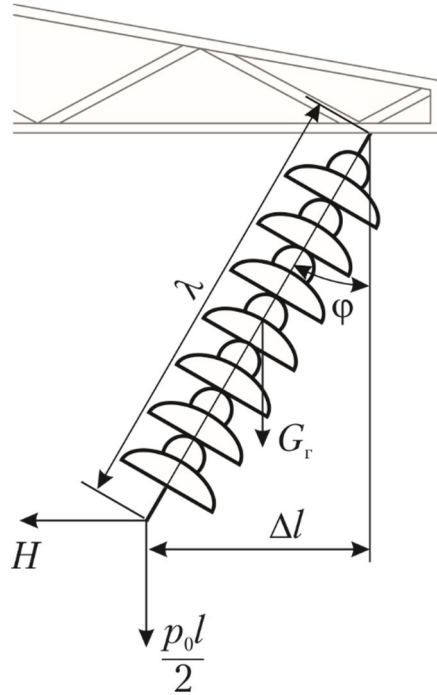


Рис. 4.5. Відхилення ізоляційного підвісу через обрив проводу

звідки

$$\Delta l = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_r}{2H} \right)^2}}. \quad (4.5)$$

Якщо дорівняти між собою рівняння (4.4) та (4.5) отримуємо

$$\frac{1}{EF} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_r}{2H} \right)^2}}. \quad (4.6)$$

Розв'язання рівняння (4.6) дозволяє визначити шукане редуковане тяжіння в матеріалі проводу в аварійному режимі повітряної лінії.

Слід зазначити, що рівняння (4.6) є складним нелінійним рівнянням, що не має аналітичного розв'язку. Для розв'язання цього рівняння слід користуватися числовими ітераційними методами, наприклад, методом Ньютона. Відповідно до методу Ньютона ітераційна формула послідовного уточнення редукованого тяжіння має вигляд

$$H_{(n+1)} = H_{(n)} - \frac{f(H_{(n)})}{f'(H_{(n)})},$$

де n – індекс поточної ітерації;

$$f(H_{(n)}) = \frac{1}{EF} (H_0 - H_{(n)}) - \frac{p_0^2 l^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_{(n)}^2} \right) - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H_{(n)}} \right)^2}};$$

$$f'(H_{(n)}) = -\frac{1}{EF} - \frac{p_0^2 l^3}{12H_{(n)}^3} - \frac{\lambda (p_0 l + G_\Gamma)^2}{4H_{(n)}^3 \left(1 + \left(\frac{p_0 l + G_\Gamma}{2H_{(n)}} \right)^2 \right)^{3/2}}.$$

Зазначимо, що розв'язання задачі визначення редукованого тяжіння за методом Ньютона дуже чутливе до вибору початкових наближень. Часто трапляються випадки, коли призначення за початкове наближення значення тяжіння в доаварійному режимі призводить до виявлення кореня нелінійного рівняння (4.6), що не має фізичного змісту (наприклад, виявлення від'ємного кореня).

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Поясніть розрахункову схему визначення редукованого тяжіння у разі обриву проводу у другому прогоні від анкерної опори.
2. Наведіть схему та рівняння моментів сил для ізоляційних підвісів у відхиленому положенні.
3. Дайте характеристику рівняння, яке дозволяє визначити редуковане тяжіння у разі обриву проводу у другому прогоні від анкерної опори.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 153-158; [34], с. 91-94.

4.3. ЗАГАЛЬНИЙ ВИПАДОК ВИЗНАЧЕННЯ РЕДУКОВАНОГО ТЯЖІННЯ

Розглянемо загальний випадок розрахунку редукованого тяжіння у разі обриву проводу у будь-якому прогоні анкерованої ділянки. Так, наприклад, на рис. 4.6 показано редукацію у разі обриву проводу у третьому прогоні від анкерної опори. Тут l_1, l_2 – довжини першого та другого вцілених прогонів, рахуючи від аварійної ділянки відповідно; H_1, H_2 – редуковані тяжіння у відповідних вцілених прогонах; $\Delta l_1, \Delta l_2$ – горизонтальні проєкції гірлянд ізоляторів у відхиленому стані на першій та другій опорах вцілених ділянок відповідно.

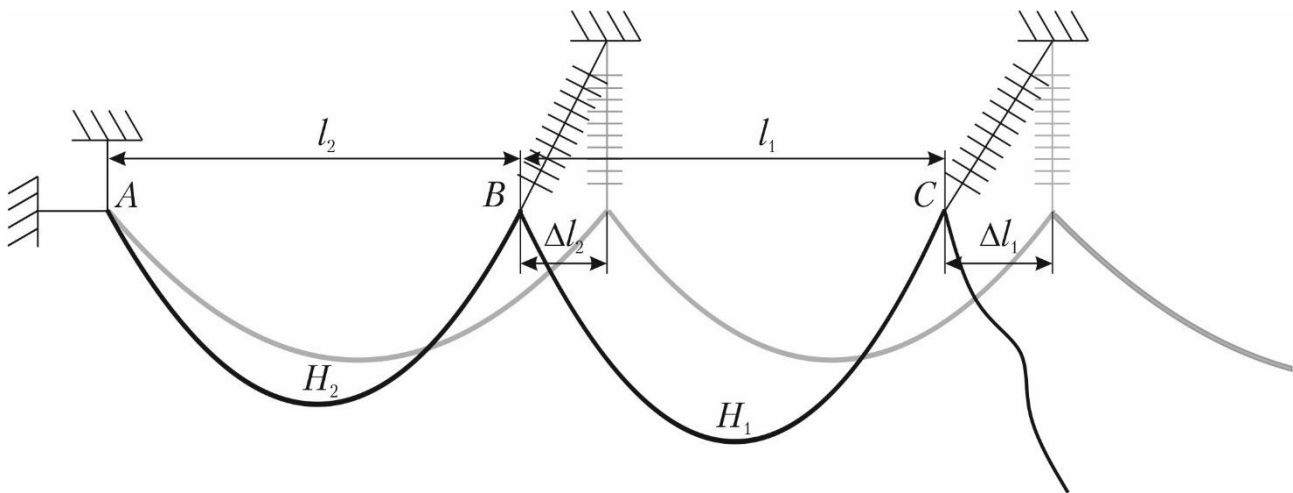


Рис. 4.6. Обрив проводу у третьому прогоні від анкерної опори

Під час розв'язання задачі визначення редукованих тяжінь у цьому разі слід зважати на дві основні обставини. Перша обставина пов'язана з тим, що зміна довжини прогону відбувається через відхилення ізоляційних підвісів по обидва боки прогону, тобто результуюча зміна довжини прогону містить дві складові

$$\Delta l = \Delta l_1 - \Delta l_2. \quad (4.7)$$

Тут складова переміщення точки закріплення проводу з боку аварійної ділянки Δl_1 призводить до скорочення довжини прогону, а складова переміщення точки закріплення проводу з боку анкерної опори Δl_2 призводить до збільшення довжини прогону, що визначає операцію віднімання у виразі (4.7).

Очевидно, що переміщення точки закріплення проводу буде тим більшим, чим ближче до місця аварії знаходиться поточна опора. Це означає, що

$$\Delta l_1 > \Delta l_2.$$

Друга обставина пов'язана з особливостями розрахунку горизонтального переміщення точки закріплення проводу через відхилення гірлянди ізоляторів. Основна особливість тут полягає в тому, що відхилення ізоляційних підвісів відбувається через дію різниці редукованих тяжінь в проводах по обидва боки опори. Розглянемо зрівноважену гірлянду ізоляторів у відхиленому стані, як показано на рис. 4.7. Тут ΔH – різниця редукованих тяжінь вцілілого проводу по обидва боки прогону (для рис. 4.6 $\Delta H = H_2 - H_1$); $p_0 l_{\text{вар}}$ – вага проводу вцілілих прогонів, навантаження від якого припадає на поточну опору; $l_{\text{вар}}$ – ваговий прогін.

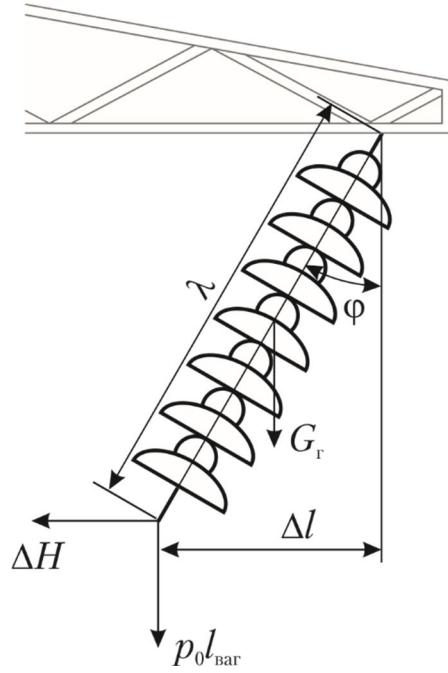


Рис. 4.7. Відхилення ізоляційного підвісу через обрив проводу

Запишемо рівняння рівноваги моментів сил відносно точки закріплення гірлянди ізоляторів

$$\sum M = -\Delta H \sqrt{\lambda^2 - \Delta l^2} + p_0 l_{\text{ваг}} \Delta l + G_r \frac{\Delta l}{2} = 0,$$

звідки

$$\Delta l = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l_{\text{ваг}} + 0,5 G_r}{\Delta H} \right)^2}}. \quad (4.8)$$

Якщо знехтувати різницею висот підвішування проводів на суміжних опорах вцілілих ділянок, довжина вагового прогону дорівнює

$$l_{\text{ваг}} \approx \frac{l_1 + l_2}{2},$$

де l_1, l_2 – довжини прогонів, суміжних з поточною опорою.

У цьому разі вираз (4.8) набуває вигляду

$$\Delta l = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 (l_1 + l_2) + G_r}{2(H_2 - H_1)} \right)^2}}, \quad (4.9)$$

де H_1 і H_2 – редуковані тяжіння в прогонах, суміжних з поточною опорою.

Зіставлення між собою виразів (4.5) та (4.9) дозволяє зробити висновок про те, що за певних зауважень вираз (4.9) можна розглядати як узагальнену формулу для визначення залежності відхилення гірлянди ізоляторів від редукованого тяжіння. Тут індексацію прогонів слід виконувати починаючи з прогону, суміжного з аварійним, а для розрахунку прогону, суміжного з аварійним, у вираз (4.9) слід підставляти нульові значення довжини прогону та редукованого тяжіння в аварійному прогоні.

Таким чином, для визначення редукованих тяжінь в аварійному режимі повітряної лінії електропередавання необхідно скласти та розв'язати систему нелінійних алгебраїчних рівнянь вигляду (4.4), де зміну довжини кожного прогону визначають за виразами (4.7) та (4.9).

Так, у разі обриву проводу у третьому прогоні від анкерної опори (див. рис. 4.6) така система рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} \frac{1}{EF}(H_0 - H_1) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_1^2} \right) = \frac{\lambda_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 l_1 + G_{r1}}{2H_1} \right)^2}} - \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0(l_1 + l_2) + G_{r2}}{2(H_2 - H_1)} \right)^2}}; \\ \frac{1}{EF}(H_0 - H_2) - \frac{p_0^2 l_2^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_2^2} \right) = \frac{\lambda_2}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0(l_1 + l_2) + G_{r2}}{2(H_2 - H_1)} \right)^2}}. \end{cases}$$

В такий самий спосіб формують системи нелінійних алгебраїчних рівнянь для будь-якої кількості вцілілих прогонів на анкерованій ділянці.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Охарактеризуйте особливість визначення зміни довжини прогону в аварійному режимі повітряної лінії за будь-якої кількості вцілілих прогонів.
2. Охарактеризуйте особливості визначення відхилення гірлянди ізоляторів у разі обриву проводу у будь-якому прогоні анкерованої ділянки.
3. Поясніть необхідність формування систем нелінійних алгебраїчних рівнянь для визначення редукованого тяжіння хоча б в одному вцілому прогоні, якщо кількість вцілілих прогонів більша одного.
4. Сформууйте систему алгебраїчних рівнянь для розрахунку редукованого тяжіння на ділянці між опорами №4 та №5 схеми анкерованої ділянки, наведеній на рис. 4.3.

ПРОЕКТНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОПОР ЗА ПРОФІЛЕМ ТРАСИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

5.1. ПОЗДОВЖНІЙ ПРОФІЛЬ ТРАСИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

Вибір траси повітряної лінії та визначення місць розташування опор є основною частиною проекту повітряної лінії електропередавання. Під час розв'язання таких задач визначають загальну кількість анкерних та проміжних опор, необхідну кількість ізоляторів та лінійної арматури, оцінюють необхідну кількість проводів та тросів тощо [7, 13, 18, 28, 31].

Очевидно, що під час вибору траси лінії та місць розташування опор, для покращення техніко-економічних показників, зокрема – зменшення капіталовкладень, проектувальник має максимально зменшити загальну кількість опор. Водночас проектувальник має зважати на особливості ґрунтів в районі траси лінії (наприклад, будівництво лінії на болотистій місцевості вимагає значно більших капіталовкладень, ніж в нормальних умовах); зручність організації будівництва (траси, які проходять вздовж залізниць та автомобільних доріг вигідніше за траси, віддалені від транспортних шляхів, які потребують додаткових витрат на доставку будівельних матеріалів); зручність організації переходів річки, водні простори та інженерні споруди (залізниці, автомобільні дороги, трубопроводи, інші лінії електропередавання тощо). На особливу увагу заслуговують питання узгодження траси лінії із землевласниками та землекористувачами. Недосконалість нормативної бази та відсутність дієвих правових механізмів у даному питанні часто призводять до суттєвого збільшення траси повітряної лінії, а, інколи – взагалі до неможливості будівництва нової повітряної лінії.

Загалом траса повітряної лінії являє собою ламану лінію, що складається з ряду прямолінійних ділянок. На кутах повороту траси встановлюють кутові опори анкерного або проміжного типу, на прямолінійних ділянках – проміжні та анкерні опори.

За даними топографічної зйомки формують поздовжній профіль, який містить інформацію про рельєф місцевості в районі траси лінії. *Поздовжній профіль траси* являє собою образ вертикального розрізу поверхні землі вздовж траси лінії, побудований на підставі результатів топографічних вимірювань [7, 34]. Такий профіль використовують для визначення місць розташування опор вздовж траси лінії і перевірки дотримання вертикальних габаритних відстаней між проводами лінії і землею або інженерними спорудами.

Для зображення поздовжнього профілю використовують горизонтальний масштаб 1:5000 і вертикальний масштаб – 1:500 [7, 34]. Такі масштаби

дозволяють визначати з достатньою точністю точки встановлення опор і висоту підвісу проводу над землею. У деяких випадках, наприклад, у разі розроблення конструкції переходу через інженерні споруди, профіль креслять у більш детальних масштабах – 1:2000 по горизонталі і 1:200 по вертикалі.

У разі, якщо траса повітряної лінії проходить по схилах гір, на поздовжній профіль траси додатково наносять нагорний та підгорний профілі. Такі профілі складають за відмітками паралельних трас праворуч та ліворуч вісі лінії на відстанях вилетів траверс опор. Лінії нагорного та підгорного профілей наносять пунктирною лінією. На поздовжній профіль наносять перехрещувані інженерні споруди (залізничні, автомобільні дороги, лінії електропередачі, зв'язку тощо) і природні перешкоди (ріки, інші водні простори). На кресленні поздовжнього профілю наносять також геологічний розріз по трасі, на якому вказують глибину залягання ґрунтів різної категорії, а також наявність ґрунтових вод і їх характеристики. Геологічний розріз викреслюють у вертикальному масштабі 1:200. Фрагмент поздовжнього профілю траси, сформований в середовищі AutoCAD, представлено, наприклад, на рис. 5.1.

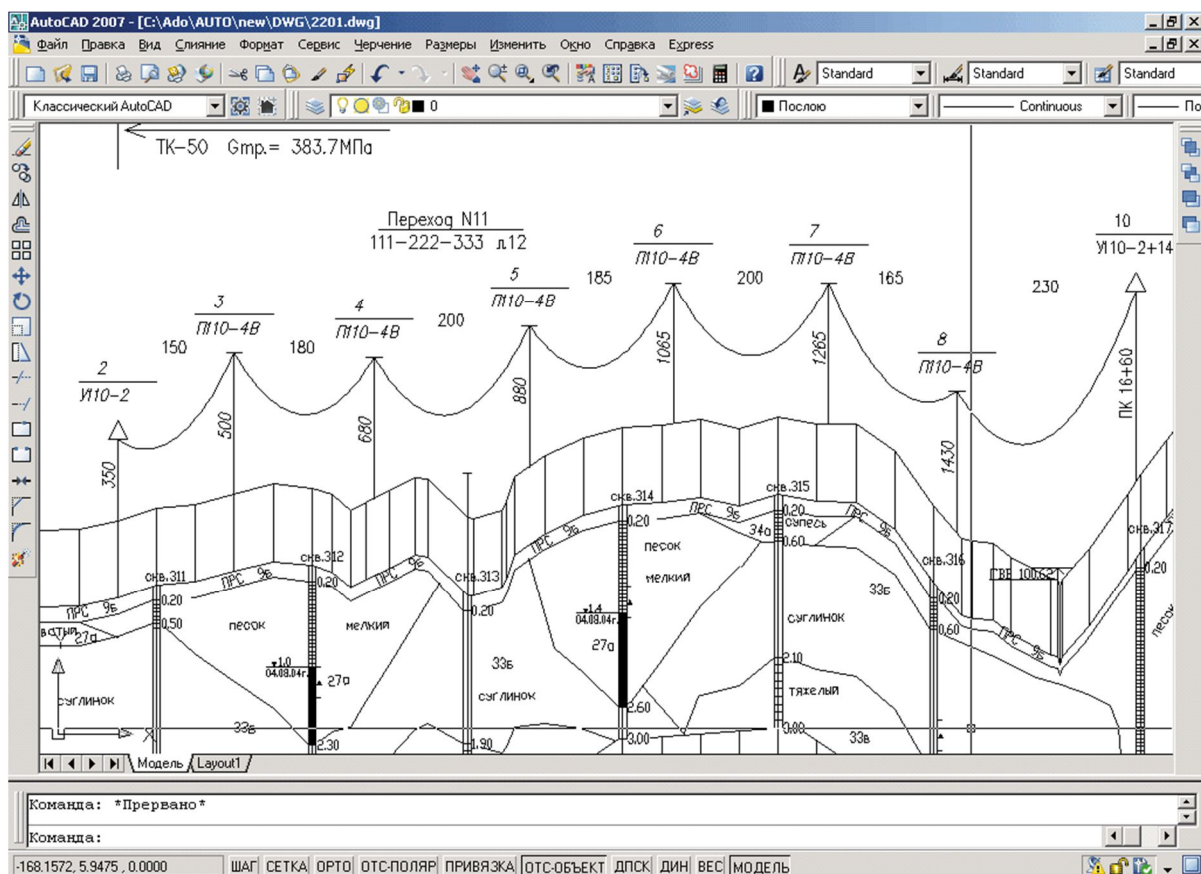


Рис. 5.1. Фрагмент поздовжнього профілю траси повітряної лінії із визначеними місцями розташування опор

Нижче, під профілем траси, в табличній формі наносять таку інформацію:

- відмітки профілю;
- горизонтальні відстані між точками, відмітки яких було заміряно;
- пікетаж, який визначає довжину траси лінії (у сотнях метрів);
- абрис (ситуація), де вказують перехрещувані трасою лінії меж полів, лугів, лісів, боліт, рік, а також інженерних споруд;
- кути повороту лінії з зазначенням їх точного значення;
- тиск на ґрунт або інші характеристики ґрунтів;
- іншу інформацію, потрібну для визначення місць розташування опор вздовж траси лінії і механічних навантажень на конструктивні елементи повітряної лінії.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає задача вибору траси повітряної лінії?
2. Дайте визначення поздовжнього профілю траси повітряної лінії.
3. Які масштаби використовують для побудови поздовжнього профілю траси?
4. Яку інформацію містить таблиця під поздовжнім профілем траси повітряної лінії?



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 174-177; [34], с. 101-104.

5.2. ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ РОЗТАШУВАННЯ ОПОР ЗА ПРОФІЛЕМ ТРАСИ

Під час розташування опор за профілем траси, потрібно задовольняти наступні вимоги [28, 32, 34].

1. Відстані від проводів до землі та перехрещуваних інженерних споруд не мають бути меншими від нормованих.
2. Вертикальні навантаження на конструктивні елементи опор не мають перевищувати своїх гранично допустимих значень.
3. Горизонтальні навантаження на конструктивні елементи опор не мають перевищувати своїх гранично допустимих значень.

Зазначені вимоги формалізують граничними значеннями довжин прогонів – габаритного, вагового та вітрового.

Габаритним називають прогін, довжина якого визначається найбільшою допустимою відстанню між опорами на ідеально рівній місцевості за умовами дотримання нормованих габаритних відстаней між проводом та землею в режимі найбільшої стріли провисання. Визначення габаритного

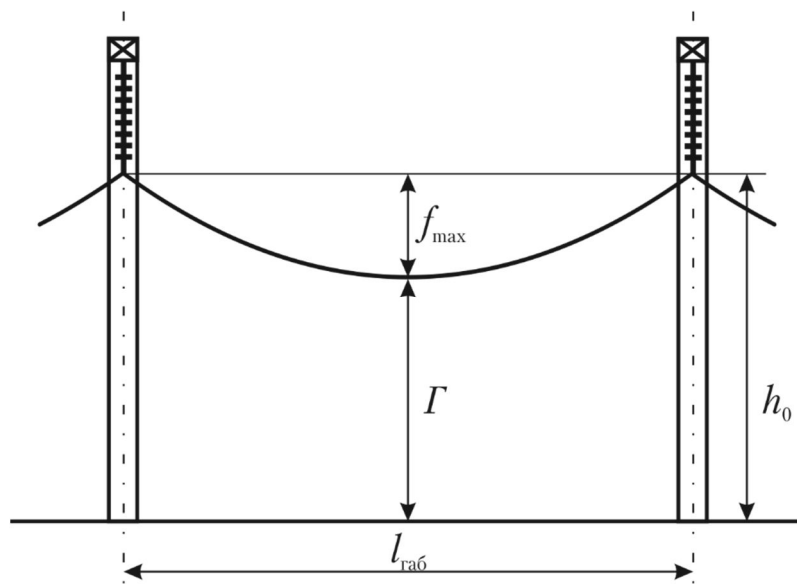


Рис. 5.2. Габаритний прогін

прогону проілюстровано на рис. 5.2. Тут f_{\max} – габаритна стріла провисання проводу; h_0 – висота закріплення проводу над землею; Γ – нормована габаритна відстань між проводом та землею.

Довжину габаритного прогону можна визначити на підставі виразу (2.31) для габаритної стріли провисання

$$l_{\text{габ}} = \sqrt{\frac{8\sigma f_{\max}}{\gamma}} = \sqrt{\frac{8\sigma(h_0 - \Gamma)}{\gamma}}, \quad (5.1)$$

де γ , σ – питоме навантаження та напруження проводу в режимі максимальної стріли провисання.

На ідеально рівній місцевості опори слід встановлювати на однакових відстанях, які дорівнюють довжині габаритного прогону. За умовами траси лінії довжини прогонів, зазвичай, менші, довжина середнього прогону траси лінії в цілому, зазвичай, на 10-20% менша габаритного прогону. Інколи, умови місцевості визначають відстані між опорами, які перевищують габаритні прогони. Характеристикою траси лінії виступає *коефіцієнт використання габаритного прогону*. Такий коефіцієнт дорівнює відношенню довжини середнього прогону лінії до габаритного прогону.

$$k_{\text{габ}} = \frac{\sum l_i}{nl_{\text{габ}}},$$

де $\sum l_i$ – довжина траси повітряної лінії; n – кількість прогонів.

Такий коефіцієнт, певною мірою, відбиває економічність траси повітряної лінії, адже чим більше коефіцієнт, тим меншу кількість опор слід встановлювати вздовж траси лінії, тобто тим менших капіталовкладень потребує будівництво повітряної лінії.

Вертикальні навантаження на конструктивні елементи опор повітряних ліній визначаються, у тому числі, вагою закріплених проводів та тросів, тобто довжиною вагового прогону. Обмеження вертикальних навантажень на конструктивні елементи опори обумовлюють гранично допустимі довжини вагового прогону для кожного типу опори, марки закріпленого проводу та кліматичного району траси лінії за ожеледними навантаженнями.

В аналогічний спосіб визначають гранично допустимі довжини вітрового прогону, обумовленого допустимими горизонтальними навантаженнями на конструктивні елементи опори. Такі прогони встановлюють для кожного типу опори, марки закріпленого проводу та кліматичного району траси лінії за вітровим навантаженням.

Зазначимо, що для типових конструкцій опор гранично допустимі вагові та вітрові прогони перевищують габаритні. Це означає, що визначення місць розташування опор слід виконувати за умовами забезпечення нормованих габаритних відстаней між проводом та землею або інженерною спорудою та, у разі необхідності, отримані відстані між опорами слід перевіряти відповідно до вимог дотримання обмежень вагових та вітрових прогонів.

У разі будівництва лінії електропередавання на ідеально рівній місцевості опори слід розташовувати на однакових відстанях одна від іншої, які дорівнюють довжині габаритного прогону для обраного типу опор. Однак у практиці проектування повітряної лінії такої ідеально рівної місцевості у районі траси лінії фактично немає. Тому у звичайних умовах нерівного профілю опори розташовують за допомогою *розбивного шаблону*.

Розбивний шаблон складається з трьох кривих максимального провисання проводу, зсунутих одна від іншої по вертикалі на певну відстань, як показано на рис. 5.3. Розбивний шаблон будують у тих самих масштабах (горизонтальному і вертикальному), що й поздовжній профіль траси в наступний спосіб.

Для побудови розбивного шаблону використовують рівняння кривої провисання проводу в прогоні вигляду

$$y = \frac{\gamma_{1(3)} x^2}{2\sigma},$$

де $\gamma_{1(3)}$ – питомі навантаження від власної ваги проводу або від ваги проводу, покритого ожеледдю відповідно до кліматичного режиму ма-

ксимальної стріли провисання; σ – напруження проводу в режимі максимальної стріли провисання.

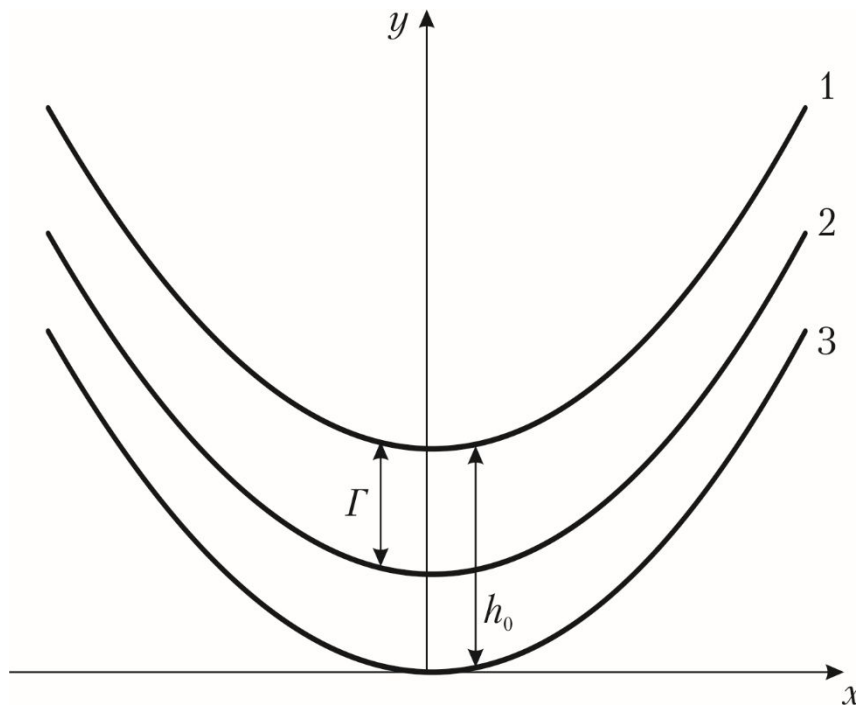


Рис. 5.3. Розбивний шаблон

У разі необхідності забезпечення високої точності криву провисання проводу слід моделювати рівнянням ланцюгової лінії

$$y = \frac{\sigma}{\gamma_{1(3)}} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma_{1(3)}}{\sigma} x \right) - 1 \right).$$

Напруження проводу в режимі максимальної стріли провисання можна визначити з основного рівняння стану проводу для прогону довжиною $0,8 \dots 0,9 l_{\text{габ}}$:

$$\sigma - \frac{\gamma_{1(3)}^2 E (0,8 \dots 0,9 l_{\text{габ}})^2}{24 \sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E (0,8 \dots 0,9 l_{\text{габ}})^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha E (t - t_0),$$

де коефіцієнт $0,8 \dots 0,9$ являє собою середнє значення коефіцієнту використання габаритного прогону.

В результаті формують верхню криву розбивного шаблону, позначену на рис. 5.3 індексом 1. Ця крива відображатиме положення нижнього проводу повітряної лінії у просторі в режимі найбільшої стріли провисання.

Далі отриману криву провисання проводу переносять паралельно вертикально вниз на відстань, яка дорівнює нормованому габариту

між проводами повітряної лінії і землею або інженерною спорудою (на рис. 5.3 позначено Γ). Значення нормованих габаритних відстаней між струмоведучими елементами лінії та поверхнею землі наведено в табл. 5.1. Отриману середню криву розбивного шаблону, позначену на рис. 5.3 індексом 2, називають габаритною. Її використовують для контролю дотримання нормованої габаритної відстані між проводом і землею або інженерною спорудою.

Таблиця 5.1. Найменші відстані від проводів повітряної лінії до поверхні землі, будівель та споруд

| Характеристика місцевості | Напруга лінії, кВ | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Населена: | | | | | | | |
| – до поверхні землі | 7 | 7 | 7,5 | 8 | 8 | 8 | 12 |
| – до будівель та споруд | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 8 | 12 |
| Ненаселена | 6 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 | 8 | 12 |
| Важкодоступна | 5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 10 |
| Недоступні гірські схили, скелі тощо | 3 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 7,5 |

Нижню криву шаблону називають земляною (крива 3 на рис. 5.3). Цю криву будують паралельним перенесенням першої кривої по вертикалі вниз на відстань, яка дорівнює висоті точки закріплення нижнього проводу на опорі над землею (на рис. 5.3 позначено h_0). За допомогою земляної кривої визначають місця розташування опор уздовж траси лінії.

У разі, якщо проект повітряної лінії передбачає використання опор різного типу з різними висотами закріплення нижнього проводу над землею, розбивний шаблон має містити дві земляні криві, побудовані для лівої та правої опор, як показано на рис. 5.4, де $Зл$ та $Зп$ – земляні криві для лівої та правої опори, зсунуті по вертикалі від кривої провисання проводу на відповідні відстані.

Безпосереднє розташування опор уздовж траси лінії виконують у спосіб, проілюстрований на рис. 5.5. Припустімо, що відоме місце розташування опори №1. Накладаємо розбивний шаблон на поздовжній профіль таким чином, щоб земляна крива перетинала профіль у місці встановлення опори (точка A на рис. 5.5), а габаритна крива торкалася профілю (точка B). Тоді друге перетинання земляної кривої поздовжнього профілю з протилежного боку параболи визначить місце положення наступної опори №2 (точка C на рис. 5.5).

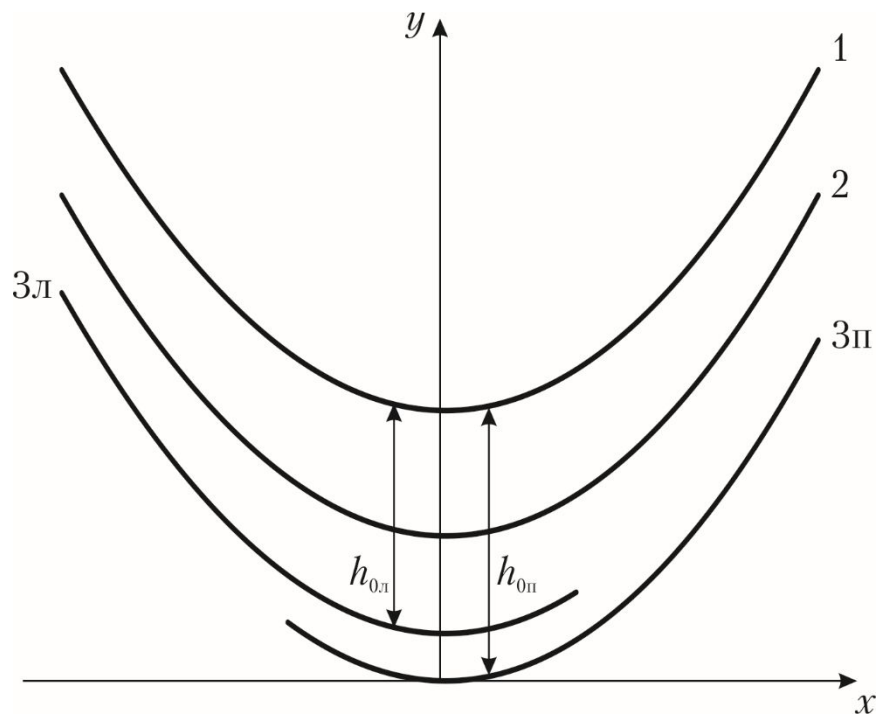


Рис. 5.4. Розбивний шаблон для опор з різними висотами точок закріплення проводу

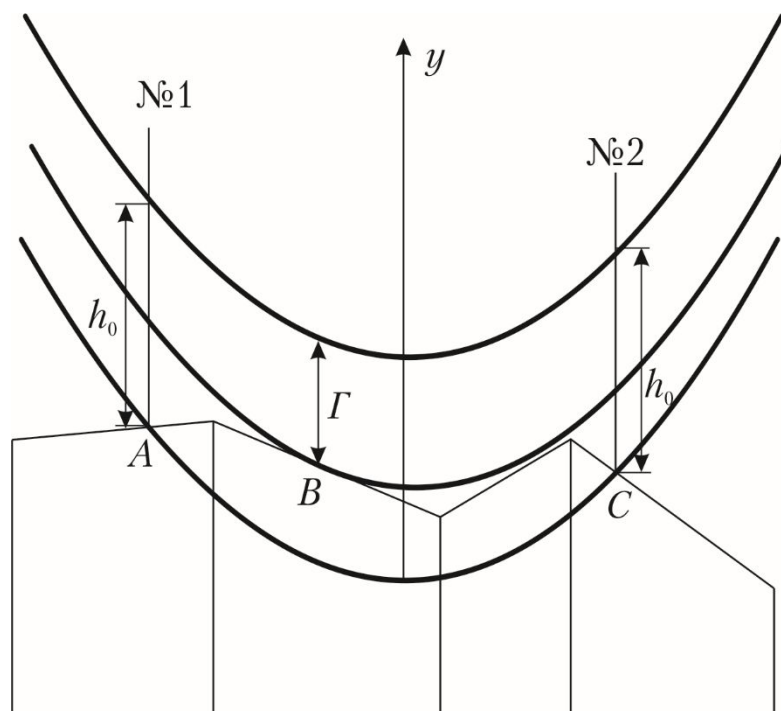


Рис. 5.5. Накладання розбивного шаблону на поздовжній профіль

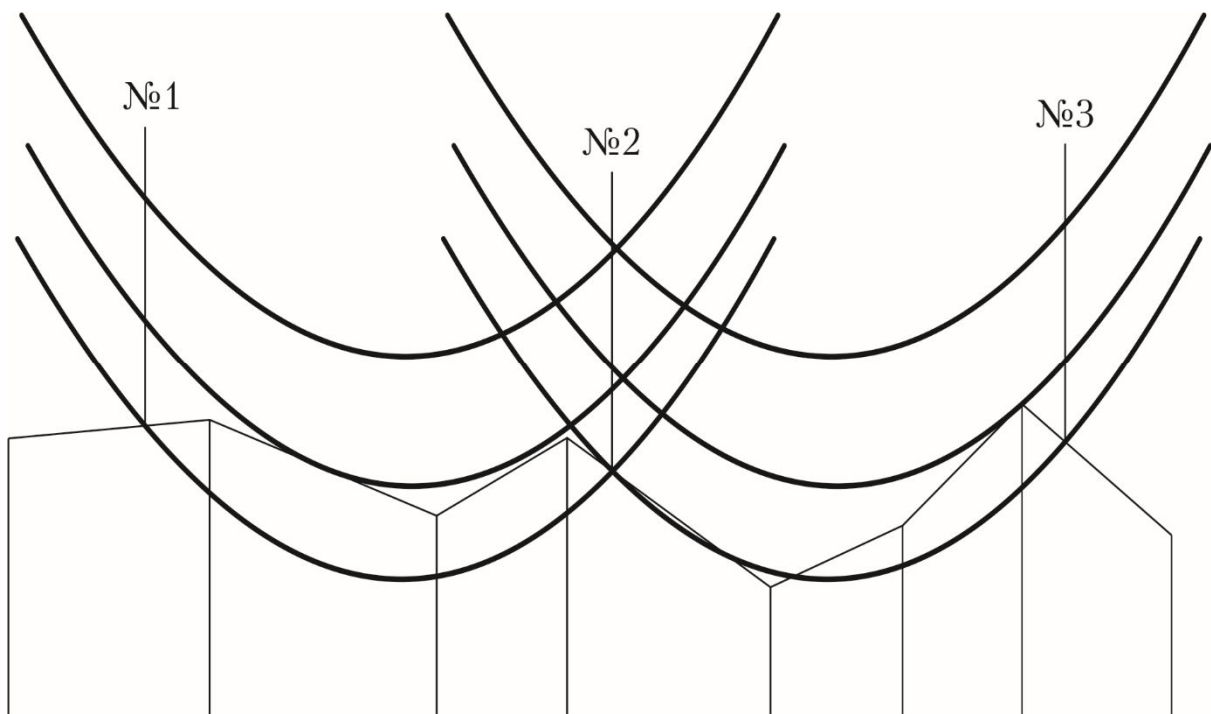


Рис. 5.6. Розташування опор вздовж профілю траси лінії

Таку операцію потрібно повторювати багаторазово до кінця прямої ділянки траси лінії, як показано на рис. 5.6. У результаті визначають місця встановлення всіх опор. Якщо останній прогін на прямій ділянці траси лінії виявиться відносно малим, то його слід збільшити за рахунок деякого скорочення попередніх прогонів. Рекомендують виконувати розташування опор таким чином, щоб довжини суміжних прогонів відрізнялись один від іншого не більше, чим у два рази.

Після визначення місць встановлення всіх опор лінії у разі необхідності слід перевірити забезпечення обмежень щодо вагових та вітрових прогонів

$$0,5(l_{1e} + l_{2e}) \leq l_{\text{вар}};$$

$$0,5(l_1 + l_2) \leq l_{\text{вітр}},$$

де l_{1e} , l_{2e} – довжини еквівалентних прогонів, суміжних з опорою.

Формально переміщення шаблону вздовж поздовжнього профілю в процесі визначення місць розташування опор можна представити зміною координат нижньої точки ланцюгової лінії, наприклад, земляної кривої розбивного шаблону:

$$y - y_0 = \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma},$$

де σ_0 та γ – механічне напруження та питоме навантаження в проводі відповідно; x_0 та y_0 – координати нижньої точки ланцюгової лінії земляної кривої розбивного шаблону в системі, пов'язаній із поздовжнім профілем траси відповідно.

Аналітичний метод розташування опор полягає у розв'язанні системи рівнянь вигляду

$$\begin{cases} y - y_0 = \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma}; \\ y = k_i x + b_i, \end{cases} \quad (5.2)$$

де k_i та b_i – коефіцієнти сімейства частково-лінійних функцій поздовжнього профілю траси повітряної лінії.

Коефіцієнти x_0 та y_0 у рівняннях (5.2) слід визначати виходячи з наступних обмежень:

1) відомі координати місця встановлення попередньої опори, що формалізується рівнянням

$$y_1 - y_{30} = \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x_1 - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma}, \quad (5.3)$$

де x_1 та y_1 – координати місця встановлення попередньої опори на поздовжньому профілі траси відповідно;

2) габаритна крива торкається поздовжнього профілю

$$\operatorname{sh} \left(\frac{\gamma(x - x_0)}{\sigma_0} \right) = k_i.$$

Складність використання представленого аналітичного методу розташування опор пов'язана з необхідністю врахування можливості дотику габаритної кривої точки зламу поздовжнього профілю, як показано на рис. 5.7 (точка *B*). Тому для реалізації автоматизованого розташування опор вздовж траси повітряної лінії доцільно застосовувати числові математичні методи, наприклад, метод прогнозу та корекції, застосування якого проілюстровано на рис. 5.8.

На попередньому етапі визначають довільне розташування розбивного шаблону, виходячи лише з обмеження щодо точки встановлення попередньої опори. Така умова визначає співвідношення між абсцисою та ординатою нижньої точки земляної кривої

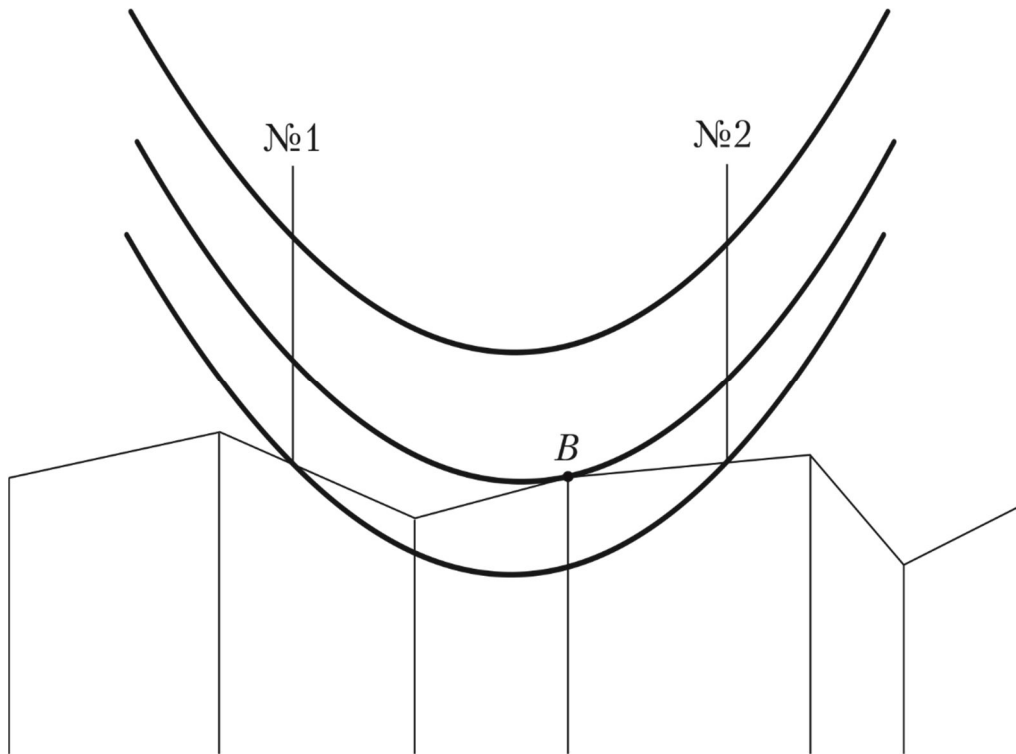


Рис. 5.7. Ілюстрація дотику габаритної кривої точки зламу поздовжнього профілю

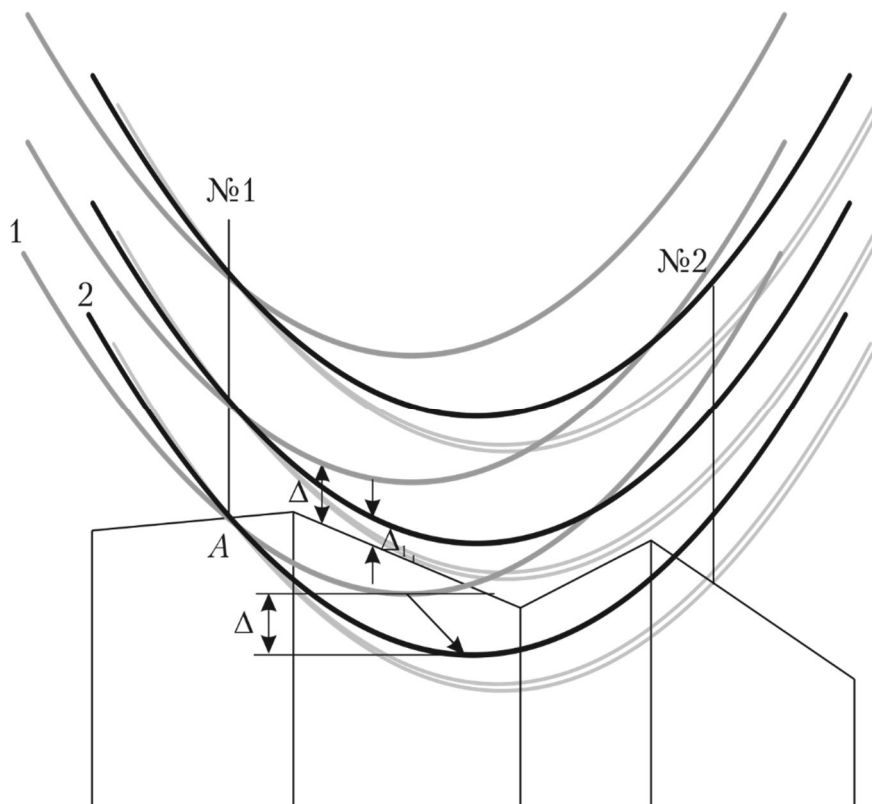


Рис. 5.8. Ітераційне пересування розбивного шаблону

$$y_0 = y_A - \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x_A - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma},$$

де x_A та y_A – координати точки встановлення опори №1.

Положення розбивного шаблону в даному випадку позначено на рис. 5.8 індексом 1.

Невиконання другого обмеження щодо дотику габаритної кривої поздовжнього профілю визначає певний «зазор» між положенням габаритної кривої та поздовжнім профілем траси, позначений на рис. 5.8 Δ . Величину «зазору» можна визначити шляхом мінімізації кусково-нелінійної різницевої функції між габаритною кривою та кусково-лінійними функціями відрізків поздовжнього профілю

$$\Delta = \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma} + y_0 + (h_0 - \Gamma) - k_i x - b_i, \quad (5.4)$$

де різниця $(h_0 - \Gamma)$ визначає вертикальний зсув між габаритною та земляною кривими шаблону.

Слід зважати на те, що різницева функція (5.4) є кусково-нелінійною та містить точки зламу. Це визначає необхідність розрахунку мінімумів різницевої функції на кожному окремому відрізку. Визначення координати точки з мінімальним значенням різницевої функції можна реалізувати на підставі аналізу знаків похідної

$$\Delta' = \operatorname{sh} \left(\frac{\gamma(x - x_0)}{\sigma_0} \right) - k_i. \quad (5.5)$$

Тут слід виокремити три можливі випадки співвідношення знаків похідної (5.5) на початку та наприкінці кожного відрізка:

- похідна (5.5) на початку та наприкінці відрізка має додатний знак

$$\Delta'(x^{\text{п}}), \Delta'(x^{\text{к}}) > 0,$$

де $x^{\text{п}}$, $x^{\text{к}}$ – горизонтальні координати точок початку та кінця кожного відрізка.

Таке співвідношення означає, що мінімум різницевої функції знаходиться на початку відрізка

$$x_{\min} = x^{\text{п}};$$

- похідна (5.5) на початку та наприкінці відрізка має від'ємний знак

$$\Delta'(x^{\text{п}}), \Delta'(x^{\text{к}}) < 0,$$

що означає, що мінімум різницевої функції знаходиться наприкінці відрізка

$$x_{\min} = x^{\kappa};$$

➤ похідна (5.5) на початку та наприкінці кожного відрізка змінює знак з від'ємного на додатний

$$\Delta'(x^{\pi}) < 0; \quad \Delta'(x^{\kappa}) > 0,$$

що означає, що мінімум різницевої функції знаходиться всередині відрізка. Тут координату мінімуму різницевої функції визначають за виразом

$$x_{\min} = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcsch}(k_i) + x_0.$$

Випадок, коли похідна (5.5) змінює знак з додатного на від'ємний не розглядають, оскільки він не має фізичного сенсу в процесі розташування опор.

«Зазор» між габаритною кривою та поздовжнім профілем визначають за виразом

$$\Delta_{\min} = \left(\operatorname{ch} \left(\frac{\gamma(x_{\min} - x_0)}{\sigma_0} \right) - 1 \right) \frac{\sigma_0}{\gamma} + y_0 + (h_0 - \Gamma) - k_i x_{\min} - b_i. \quad (5.6)$$

«Зазор» визначає необхідність пересування розбивного шаблону вздовж земляної кривої з фіксацією точки встановлення попередньої опори. Таку операцію можна розглядати як корекцію положення шаблону на поздовжньому профілі траси. Безпосередньо величина «зазору» визначає вертикальну складову зсуву. Вимога перетинання земляної кривої з поздовжнім профілем в точці А обумовлює також горизонтальний зсув шаблону, що формалізується виразами для уточнених значень координат нижньої точки земляної кривої

$$y_{30}^{(n)} = y_{30}^{(n-1)} - \Delta_{\min};$$

$$x_0^{(n)} = x_1 - \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{arcch} \left(\frac{\gamma}{\sigma_0} (y_1 - y_{30}^{(n)}) + 1 \right),$$

де n – індекс ітерації корекції положення розбивного шаблону.

В результаті такої корекції шаблон займає положення 2 на рис. 5.8.

Горизонтальна складова зсуву шаблону визначає нову, відмінну від нуля величину «зазору» між габаритною кривою та поздовжнім профілем траси лінії, позначену на рис. 5.8 Δ_1 , що обумовлює необхідність проведення повторної корекції координати нижньої точки земляної кривої.

Таким чином отримують швидкозбіжний ітераційний процес уточнення положення розбивного шаблону, критерієм завершення якого є зневажливо мала величина зазору (5.6)

$$|\Delta_{\min}| \leq \varepsilon,$$

де ε визначає інженерну точність розрахунків.

Після досягнення інженерної точності розрахунків визначають координати точки встановлення опори №2. Цьому положенню відповідає точка перетину земляної кривої із поздовжнім профілем траси. Для визначення координат такої точки розв'язують систему алгебраїчних рівнянь (5.2).

Описаний алгоритм повторюють багаторазово для всієї анкерованої ділянки, розміщуючи на поздовжньому профілі всі проміжні опори.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Перелічіть вимоги щодо визначення місць розташування опор вздовж траси повітряної лінії.
2. Дайте визначення габаритного прогону.
3. Поясніть обмеження вагових та вітрових прогонів для кожного типу опор.
4. Поясніть, чому розташування опор виконують виключно за умовами забезпечення нормованих габаритних відстаней, а вимоги дотримання вагових та вітрових прогонів перевіряють тільки у разі необхідності?
5. Дайте визначення та наведіть послідовність побудови розбивного шаблону.
6. Яким чином застосовують розбивний шаблон для визначення місць розташування опор вздовж траси повітряної лінії?
7. Наведіть алгоритм автоматизованого розташування опор вздовж траси повітряної лінії.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 193-198; [34], с. 105-110.

5.3. ПЕРЕВІРКА ОПОР НА ВИРИВАННЯ

Під час розташування опор вздовж траси лінії на пересіченій місцевості можливий випадок, коли одна з опор виявляється розташованою набагато нижче, ніж суміжні, як показано на рис. 5.9, де h_1, h_2, h_3 – відмітки закріплення проводу на відповідних опорах; l_1, l_2 – довжини прогонів; θ_1, θ_2 – кути нахилу прямих, що поєднують точки закріплення проводу у відповідних прогонах. В такій ситуації в режимі мінімальних температур через теплове скорочення довжини проводу можливе виникнення направленої догори рівнодіючої тяжини. Це буде викликати сіпання ізоляційного підвісу та аварійне перекриття між фазним проводом та металевою траверсою опори. Таке явище називають «вириванням» опори.

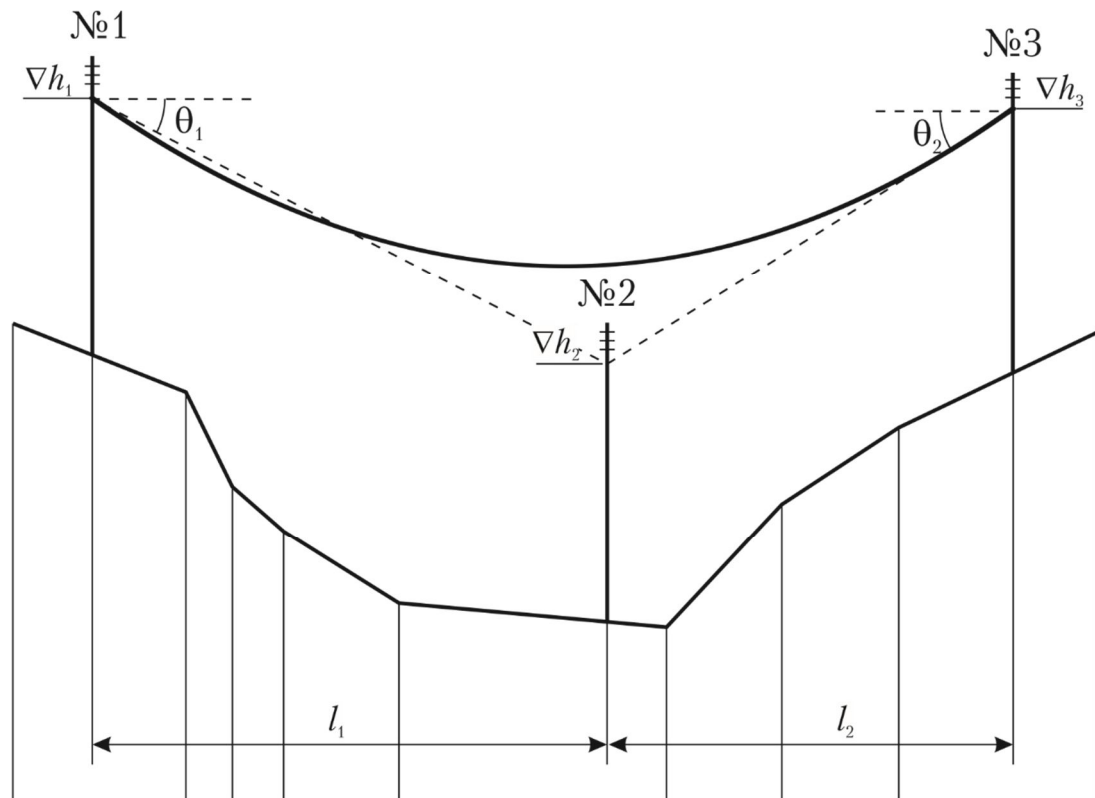


Рис. 5.9. Перевірка опор на виривання

Відповідно до виразу (2.44) вертикальна складова тяжіння в точці закріплення проводу на нижній опорі буде направлена догори у разі, якщо

$$p_1 \frac{l_1 + l_2}{2} < H (\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2), \quad (5.7)$$

де p_1 – одиничне навантаження від власної ваги проводу; H – горизонтальна складова тяжіння в матеріалі проводу в режимі мінімальних температур.

Для перевірки виникнення явища «виривання» опор використовують *мінімальний шаблон*. Останній являє собою криву провисання проводу в режимі мінімальної стріли провисання, тобто режимі мінімальних температур, побудовану в тому самому масштабі, що й поздовжній профіль траси. Мінімальний шаблон накладають на профіль таким чином, щоб він проходив через точки закріплення проводу на опорах, суміжних з розташованою на нижній відмітці (опори №1 та №3 на рис. 5.9). У разі, якщо крива мінімального шаблону пройде вище точки закріплення проводу на нижній опорі, то це означає, що в режимі мінімальних температур буде мати місце направлена догори рівнодіюча тяжіння.

Для отримання аналітичного запису критерію виникнення виривання опори необхідно сформулювати рівняння мінімального шаблону та визначити

відстань між шаблоном та точкою закріплення проводу на опорі №2. Відповідно до виразу (2.36) стріла провисання мінімального шаблону над опорою №2 становить

$$f = \frac{\gamma_1 l_1 l_2}{2\sigma},$$

де γ_1 – питоме навантаження від власної ваги проводу; σ – напруження проводу в режимі мінімальних температур.

Вертикальна відстань між точкою закріплення проводу на опорі №1 та мінімальним шаблоном над опорою №2 з урахуванням перепаду висот точок закріплення проводу на опорах №№1 та 3 дорівнює

$$\Delta_1 = \frac{\gamma_1 l_1 l_2}{2\sigma} + \frac{(h_1 - h_3) l_1}{l_1 + l_2}. \quad (5.8)$$

Порівняння отриманої вертикальної відстані з перепадом висот точок закріплення проводу на опорах №№1 та 2 дозволить зробити висновок про можливість виникнення явища виривання опори. Очевидно, якщо вертикальна відстань між точкою закріплення проводу на опорі №1 та кривою мінімального шаблону над опорою №2 менша за перепад висот точок закріплення проводу на опорах №№1 та 2, то явище «виривання» опори буде спостерігатися в режимах найменших температур. В іншому разі таке явище не буде мати місце. Отже, аналітичний запис критерію виникнення явища виривання опори має вигляд

$$\frac{\gamma_1 l_1 l_2}{2\sigma} + \frac{(h_1 - h_3) l_1}{l_1 + l_2} < h_1 - h_2.$$

Аналогічний запис критерію можна сформулювати по відношенню до точки закріплення проводу на опорі №3:

$$\frac{\gamma_1 l_1 l_2}{2\sigma} + \frac{(h_3 - h_1) l_2}{l_1 + l_2} < h_3 - h_2.$$

Відповідно до виразу (5.7) силу, яка буде «виривати» опору можна визначити за виразом

$$V = H (\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2) - p_1 \frac{l_1 + l_2}{2}, \quad (5.9)$$

де H – горизонтальна складова тяжіння проводу за мінімальної температури; θ_1, θ_2 – кути нахилу до горизонталі прямих, які поєднують точки закріплення проводу на нижній опорі та суміжних (див. рис. 5.9); p_1 – одиничне навантаження від власної ваги проводу.

Для запобігання сіпання підтримуючих ізоляційних підвісів застосовують такі заходи [7, 34]:

- 1) підвішування баласту на ізоляційному підвісі нижньої опори;
- 2) встановлення понижених опор на вищих відмітках та/або підвищеної опори на нижній відмітці;
- 3) ослаблення тяжіння проводу;
- 4) встановлення анкерної опори замість нижньої опори.

Розглянемо перелічені заходи більш детально.

Баласт, який слід закріплювати на підвісних ізоляторах має зрівноважувати направлену вгору рівнодіючу тяжіння в режимі мінімальних температур. Вагу баласту, зазвичай, збільшують виходячи з вимоги обмеження кута відхилення ізоляційного підвісу у вітровому режимі повітряної лінії відповідно до виразу

$$G \geq V + \frac{kp_4}{\operatorname{tg} \varphi_{\max}} l_{\text{вітр}} = H (\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2) + \left(\frac{kp_4}{\operatorname{tg} \varphi_{\max}} - p_1 \right) \frac{l_1 + l_2}{2}, \quad (5.10)$$

де k – коефіцієнт, який враховує коливання проводів у разі їх відхилень під дією вітру, значення якого визначають за даними табл. 3.19; p_4 – одиничне навантаження, яке зазнає провід під натиском вітру; φ_{\max} – гранично допустимий кут відхилення ізоляційного підвісу.

Застосування даного заходу обмежене гранично допустимими вертикальними навантаженнями на підтримуючі ізоляційні підвіси та траверси опор в режимах максимальних навантажень.

Застосування понижених та підвищених опор можливо лише за умов наявності відповідних типових конструкцій опор, які дозволять зменшити перепад точок закріплення проводів на суміжних опорах.

Ослаблення тяжіння проводу використовують у виключних випадках. Справа в тому, що такий захід пов'язаний із збільшенням стріл провисання проводу і, як наслідок, до збільшення кількості проміжних опор на анкерованій ділянці.

Використання анкерної опори замість проміжної є найбільш радикальним заходом, оскільки для таких опор наявність направлено догори тяжіння не має суттєвого значення. Тут для зменшення капіталовкладень в конструкцію лінії можна застосовувати анкерну опору полегшеного типу. Під час застосування даного заходу слід зважати на те, що вертикальна складова тяжіння в точці закріплення проводу на опорі може орієнтувати гірлянди ізоляторів шапками униз. Це не має значення в режимі мінімальних температур, тобто у суху погоду, але, якщо положення не змінюється і в інших кліматичних режимах, коли можливий дощ або мокрий сніг, гірлянди ізоляторів слід закріплювати шапками у бік прогону.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає явище виривання опор?
2. Наведіть критерій виникнення явища виривання опор.
3. Наведіть вираз для визначення направленої догори рівнодіючої тяжіння.
4. Перелічіть та охарактеризуйте заходи, направлені на запобігання сипання підтримуючих гірлянд ізоляторів.



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 204-209; [34], с. 110-111.

5.4. РОЗРАХУНКИ ПЕРЕХОДІВ

Під час проектування повітряних ліній електропередавання особливої уваги потребує організація переходів через інженерні споруди – електрифіковані залізниці, шосейні дороги, трамвайні та тролейбусні лінії, інші лінії електропередавання тощо. Тут після визначення місць розташування опор ліній електропередавання необхідно упевнитися в дотриманні вимог щодо нормованих габаритних відстаней між проводами лінії та інженерними спорудами [33, 34].

Для визначення висоти розташування проводу над об'єктами, що перетинаються, виконують розрахунок за схемою, наведеною на рис. 5.10, де l – довжина прогону; h_1, h_2 – відмітки закріплення проводів на опорах №№1 та 2, які обмежують перехід; Δh – різниця відміток закріплення проводів на опорах; h – відмітка об'єкту, що перетинається (у даному разі – шосейної дороги); θ – кут нахилу прямої, яка поєднує точки закріплення проводів на опорах; x – відстань по горизонталі між віссю інженерної споруди та опорою, розташованою на вищій відмітці; y – відстань по вертикалі між проводом над віссю об'єкта та горизонталлю на рівні закріплення проводу на верхній опорі; Γ – вертикальна відстань між проводом та інженерною спорудою. На рис. 5.10 для прикладу представлено розрахункову схему переходу через шосейну дорогу. Переходи через інші інженерні споруди виконують за аналогічними схемами.

Відповідно до даних рис. 5.10 вертикальну відстань між проводом та об'єктом, що перетинається, визначають за виразом

$$\Gamma = h_2 - h - y.$$

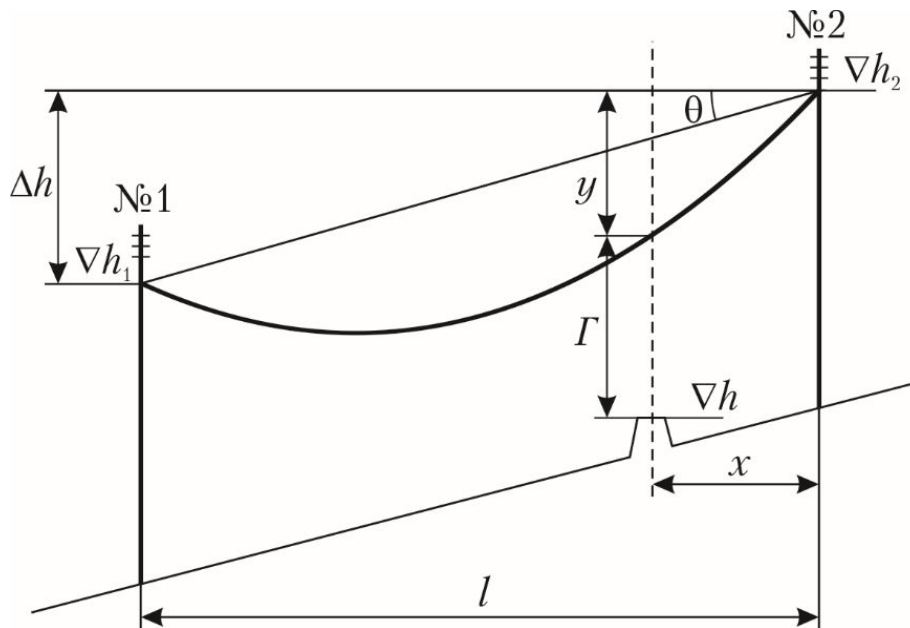


Рис. 5.10. Перехід лінії через шосейну дорогу

Своєю чергою, відстань між проводами над віссю інженерної споруди та горизонталлю можна визначити за рівнянням кривої провисання проводу за виразом

$$y = \frac{\gamma x}{2\sigma} (l - x) + x \operatorname{tg} \theta = \frac{\gamma x}{2\sigma} (l - x) + x \frac{\Delta h}{l}, \quad (5.11)$$

де γ та σ – питоме навантаження та напруження проводу в розрахунковому кліматичному режимі.

Слід зазначити, що габарити на переходах через залізниці визначають для режиму максимально допустимої температури проводу в режимі максимальних навантажень ($+70^{\circ}\text{C}$ для сталевих проводів традиційного виконання); в місцях перетинання повітряних ліній між собою розрахунок виконують за температури $+15^{\circ}\text{C}$ без вітру; для інших переходів – в режимі максимальної стріли провисання проводу.

У разі, якщо одна або обидві опори переходу – проміжні, то додатково слід виконувати розрахунки габаритів в аварійному режимі, обумовленому обривом проводу у сусідньому прогоні. Такий розрахунок виконують для експлуатаційного режиму за середньорічної температури. Виключення складають перехрещення повітряних ліній між собою, для яких аварійний режим не розраховують.

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає розрахунок переходів повітряних ліній електропередавання?

2. Поясніть розрахункову схему переходу повітряної лінії, наведену на рис. 5.10 та відповідну розрахункову модель.
3. Для яких кліматичних режимів виконують розрахунки переходів повітряних ліній?
4. За яких умов під час розрахунків переходів виконують розрахунки аварійних режимів?



РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[7], с. 210-214; [34], с. 111-117.

5.5. РОЗРАХУНОК МОТАЖНИХ СТІЛ ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ

Монтаж проводів повітряних ліній здійснюють окремо для кожної анкерованої ділянки. Процедура монтажу складається з наступних етапів [37, 38]:

- 1) розкочування та, у разі необхідності, з'єднання окремих відрізків проводів;
- 2) підйом проводів на опори;
- 3) натягування проводів та закріплення на ізоляційних підвісах.

Найбільш відповідальним етапом тут є натягування проводів між анкерними опорами. Провід має бути закріплений на опорах таким чином, щоб були забезпечені нормовані габаритні відстані між проводом та землею або інженерною спорудою, а напруження проводу у будь-яких кліматичних режимах відповідало своїм розрахунковим значенням. Натягування проводів здійснюють за допомогою спеціальних тягових механізмів, як показано на рис. 5.11. Натяг проводу контролюють безпосередньо за допомогою динамометру, або неявно за величиною стріли провисання, оскільки між тяжінням та стрілою провисання існує однозначний зв'язок (див. вираз (2.31)).

Останній спосіб, внаслідок своєї простоти, дає більш надійні результати і тому отримав широкого поширення під час монтажу повітряних ліній. Під час виконання даної операції здійснюють регулювання стріл провисання відповідно до поточних кліматичних умов. Тут спочатку натягують провід дещо більше за необхідне. Протягом певного періоду часу провід під власною вагою витягується. Після цього безпосередньо здійснюють регулювання стріл провисання. Контроль (візування) стріл провисання проводу проілюстровано на рис. 5.12. Такий контроль здійснюють на одному-двох прогонах анкерованої ділянки.

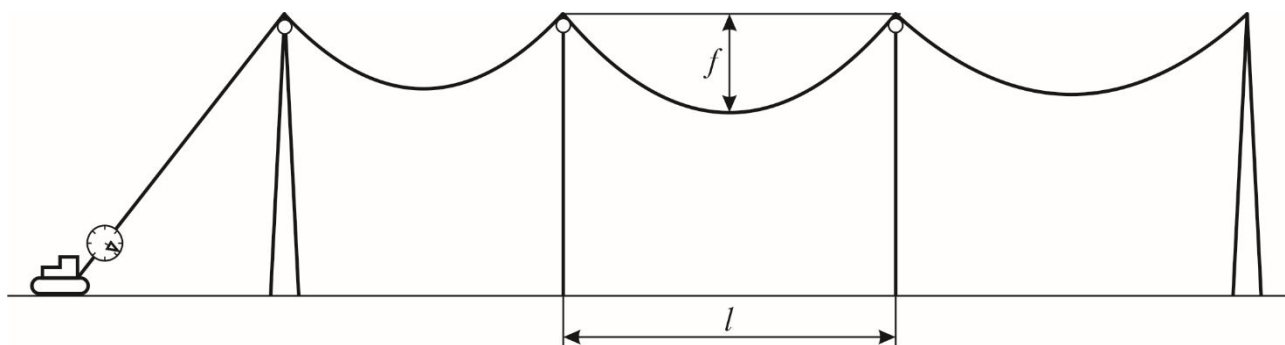


Рис. 5.11. Натягування проводів повітряної лінії

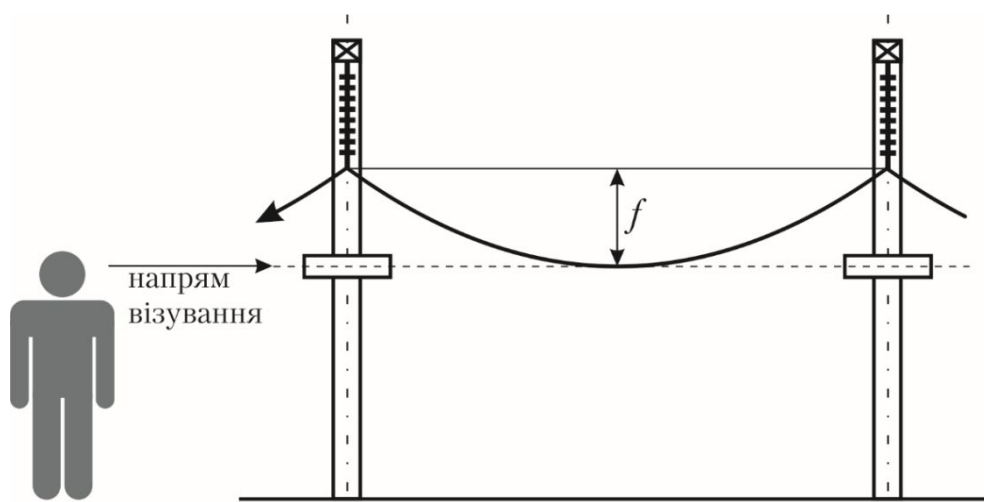


Рис. 5.12. Візування стріл провисання

Монтаж проводів повітряних ліній здійснюють за різних кліматичних умов, першою чергою – за різних температур повітря, навантаженням від ваги ожеледі та натиску вітру нехтують. Це означає, що для правильного натягу проводів необхідно знати залежність тяжіння та стріл провисання від температури. Така залежність визначається складним нелінійним рівнянням стану проводу у прогоні (3.22). Разом з тим, в діапазоні експлуатаційних температур залежність напруження від температури у разі, якщо провід зазнає навантаження лише від власної ваги, близька до гіперболи. Відповідно зворотна залежність стріли провисання від температури наближається до лінійної, що проілюстровано на рис. 5.13, де суцільними лініями показано фактичні залежності напруження та стріли провисання від температури, а пунктирними – ідеальні гіпербола та лінійна залежності відповідно. На рис. 5.14 наведені залежності похибки моделювання стріли провисання лінійною функцією від температури, де криві 1–3 відповідають лінійній інтерполяції монтажних стріл за максимальної температури та мінімальної, -15°C та середньорічної температури відповідно. Пунктирними лініями показано середні значення відповідних похибок в діапазоні експлуатаційних температур проводу.

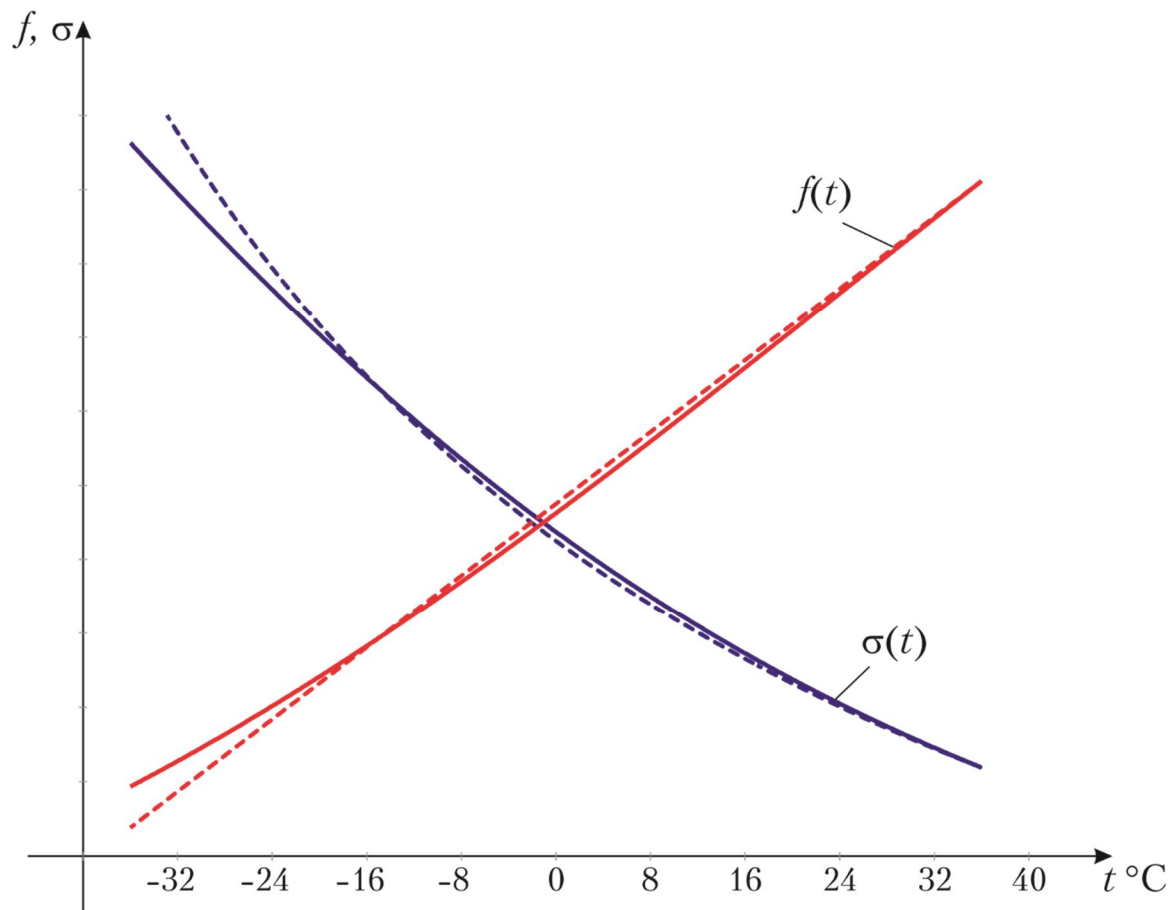


Рис. 5.13. Монтажні графіки

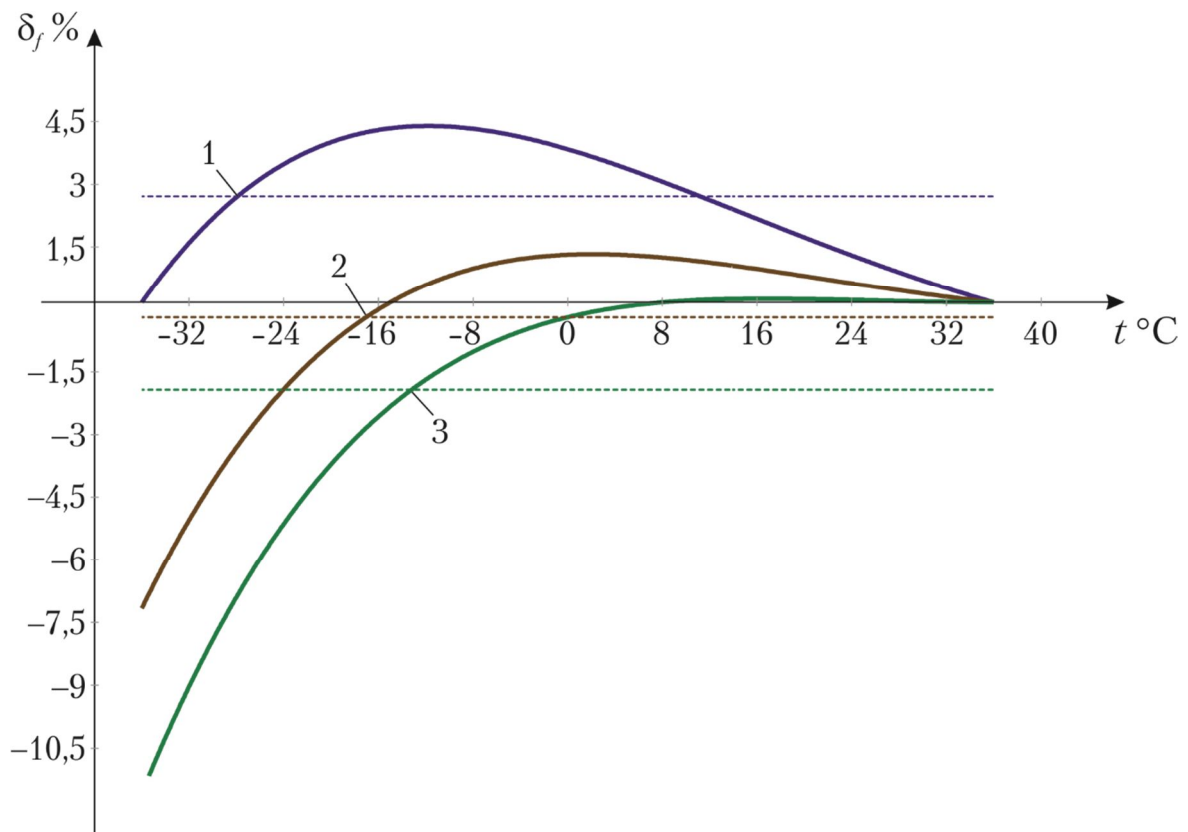


Рис. 5.14. Похибка лінеаризації монтажної стріли провисання

З аналізу даних, наведених на рис. 5.14 випливає, що найменша середня похибка лінеаризації монтажних стріл провисання має місце у разі лінійної інтерполяції залежності за стрілами провисання в режимах максимальних температур та монтажному за температури -15°C . Причому в діапазоні додатних та малих від'ємних температур похибка зневажливо мала і збільшується в діапазоні найнижчих температур.

Таким чином, контроль стріл провисання під час монтажу повітряних ліній можна виконувати за даними їх лінійних залежностей від температури. Графіки таких залежностей називають *монтажними*.

Для аналітичного визначення стріл провисання за проміжних значень температури використовують лінійну інтерполяцію монтажного графіку за допомогою біному

$$f(t) = at + b,$$

де a та b – коефіцієнти лінійної функції.

Після підстановки в біном значень максимальної температури, температури монтажного режиму та відповідних стріл провисання отримуємо систему лінійних рівнянь, розв'язання якої визначає коефіцієнти лінійної залежності

$$\begin{cases} f_{\max} = at_{\max} + b; \\ f_{\text{мнт}} = at_{\text{мнт}} + b, \end{cases} \begin{cases} a = \frac{f_{\max} - f_{\text{мнт}}}{t_{\max} - t_{\text{мнт}}} = \frac{\gamma_1 l^2}{8} \frac{\left(\frac{1}{\sigma_{\max}} - \frac{1}{\sigma_{\text{мнт}}} \right)}{t_{\max} - t_{\text{мнт}}}; \\ b = \frac{f_{\text{мнт}} t_{\max} - f_{\max} t_{\text{мнт}}}{t_{\max} - t_{\text{мнт}}} = \frac{\gamma_1 l^2}{8} \frac{\left(\frac{t_{\max}}{\sigma_{\text{мнт}}} - \frac{t_{\text{мнт}}}{\sigma_{\max}} \right)}{t_{\max} - t_{\text{мнт}}}, \end{cases} \quad (5.12)$$

де γ_1 – питоме навантаження від власної ваги проводу; σ_{\max} та $\sigma_{\text{мнт}}$ – напруження проводу в режимах максимальної температури та монтажному відповідно; f_{\max} та $f_{\text{мнт}}$ – стріли провисання у цих режимах; l – довжина прогону.

Аналіз виразів (5.12) свідчить про те, що кут нахилу лінійної залежності монтажного графіку для кожного прогону визначається квадратом його довжини. Всі інші параметри є фіксованими в межах анкерованої. Це означає, що можна легко здійснити перерахунок монтажного графіку для будь-якого прогону анкерованої ділянки за виразом

$$f_i(t) = f_{\text{зв}}(t) \left(\frac{l_i}{l_{\text{зв}}} \right)^2, \quad (5.13)$$

де $l_{\text{зв}}$ – довжина зведеного прогону; $f_{\text{зв}}(t)$ – монтажна стріла провисання для зведеного прогону.

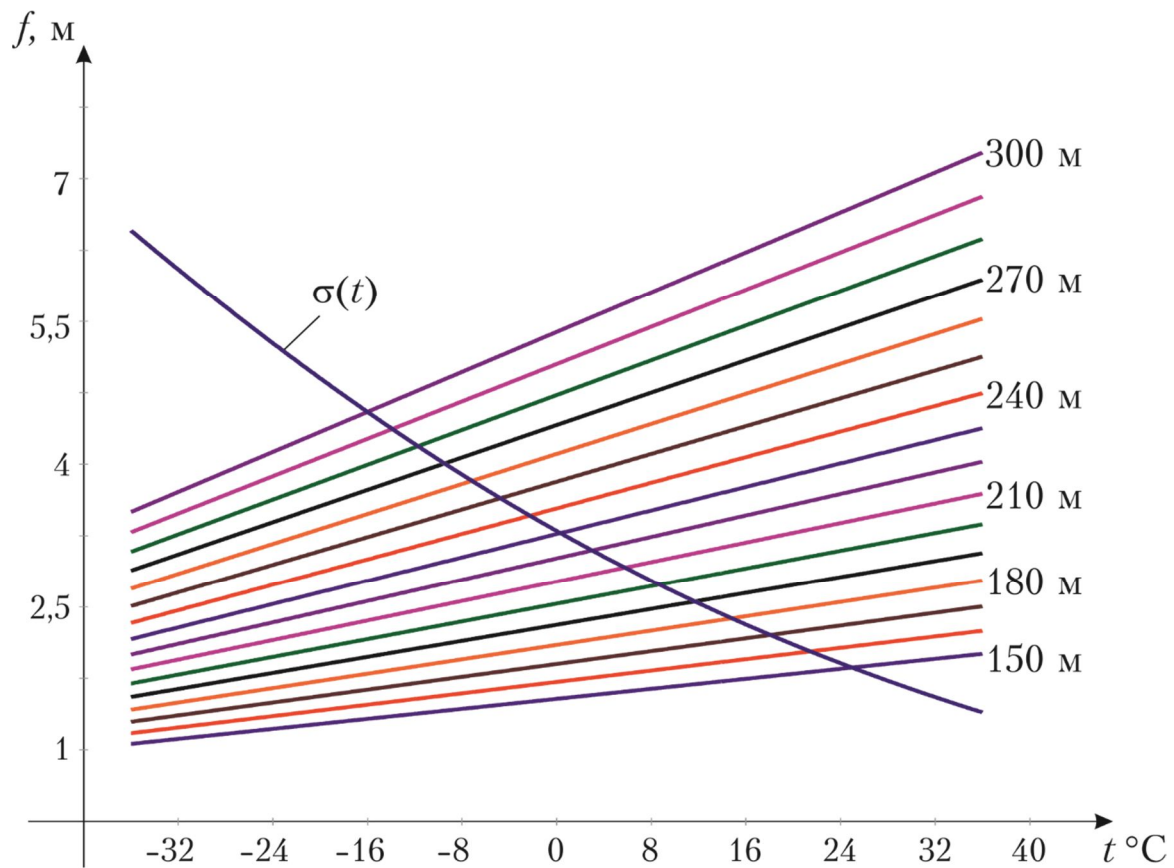


Рис. 5.15. Монтажні графіки

| Монтажные максимальные стрелы провеса | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Правка Печать Закрыть | | | | | | | | | | |
| t(°C)\L(m) | 86.096 | 103.31 | 120.53 | 137.75 | 154.97 | 172.19 | 189.41 | 206.63 | 223.85 | 241.07 |
| -30 | 0.45015 | 0.67134 | 0.92271 | 1.2001 | 1.5003 | 1.821 | 2.1603 | 2.5165 | 2.8885 | 3.2751 |
| -25 | 0.50086 | 0.738 | 1.0043 | 1.2957 | 1.609 | 1.9421 | 2.2931 | 2.6606 | 3.0433 | 3.4403 |
| -20 | 0.55916 | 0.81224 | 1.0932 | 1.3981 | 1.7242 | 2.0692 | 2.4316 | 2.8099 | 3.2031 | 3.6102 |
| -15 | 0.62494 | 0.89349 | 1.1885 | 1.5065 | 1.8447 | 2.2013 | 2.5747 | 2.9636 | 3.367 | 3.7839 |
| -10 | 0.69738 | 0.98064 | 1.2891 | 1.6196 | 1.9696 | 2.3374 | 2.7215 | 3.1207 | 3.534 | 3.9605 |
| -5 | 0.77492 | 1.0722 | 1.3935 | 1.7361 | 2.0975 | 2.4762 | 2.8708 | 3.2801 | 3.7032 | 4.1393 |
| 0 | 0.8557 | 1.1664 | 1.5003 | 1.8546 | 2.2274 | 2.6168 | 3.0218 | 3.4411 | 3.8739 | 4.3194 |
| 5 | 0.93791 | 1.2618 | 1.6081 | 1.9742 | 2.358 | 2.7582 | 3.1734 | 3.6027 | 4.0452 | 4.5001 |
| 10 | 1.0201 | 1.3572 | 1.7159 | 2.0936 | 2.4887 | 2.8995 | 3.3251 | 3.7643 | 4.2164 | 4.6808 |
| 15 | 1.1011 | 1.4517 | 1.8228 | 2.2123 | 2.6185 | 3.0401 | 3.476 | 3.9253 | 4.3871 | 4.8608 |
| 20 | 1.1804 | 1.5445 | 1.9282 | 2.3296 | 2.7471 | 3.1795 | 3.6258 | 4.0851 | 4.5567 | 5.0399 |
| 25 | 1.2577 | 1.6353 | 2.0317 | 2.4451 | 2.874 | 3.3173 | 3.7741 | 4.2435 | 4.7249 | 5.2176 |
| 30 | 1.3326 | 1.724 | 2.1332 | 2.5586 | 2.9989 | 3.4532 | 3.9205 | 4.4002 | 4.8914 | 5.3937 |

Рис. 5.16. Монтажна таблиця

На практиці, зазвичай, будують монтажні графіки для прогонів, довжина яких змінюється з кроком 10 м в діапазоні температур $-35...+35^{\circ}\text{C}$, як показано на рис. 5.15. Такі залежності, оформлені в табличній формі, представлені, наприклад, на рис. 5.16, називають *монтажними таблицями*. Інколи монтажні графіки оформлюють у вигляді нелінійних залежностей стріл провисання від довжини прогону за різних температур з кроком 5°C , як показано, наприклад, на рис. 5.17.

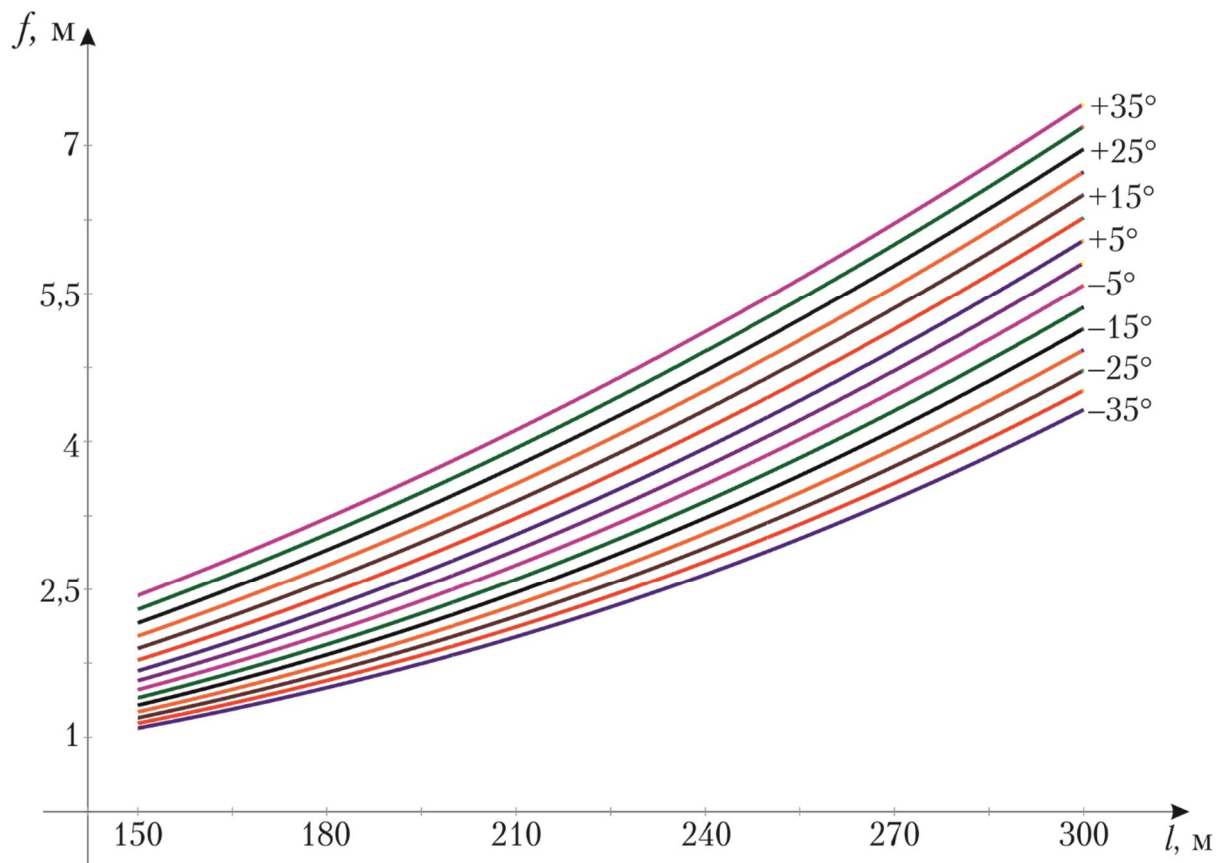


Рис. 5.17. Монтажні графіки

❓ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Перелічіть основні етапи монтажу проводів повітряних ліній.
2. Перелічіть та охарактеризуйте способи контролю натягу проводів повітряної лінії.
3. Дайте визначення монтажних графіків та монтажних таблиць.
4. За яких умов монтажні графіки можна інтерпретувати лінійними залежностями?
5. Охарактеризуйте форми подання монтажних графіків та поясніть зв'язок з монтажними таблицями.

**РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

[7], с. 215-221; [34], с. 111-114.

5.6. СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

Проектування повітряної лінії електропередавання полягає у розв'язанні складної інженерно-технічної задачі з вибору конструктивного виконання лінії, таким чином, щоб були задоволені наступні вимоги:

- достатньої пропускної здатності лінії електропередавання;
- необхідної електричної міцності конструкції лінії;
- електричної безпеки експлуатації повітряної лінії;
- достатньої механічної міцності конструктивних елементів повітряної лінії електропередавання;
- економічності конструкції лінії.

Таке завдання умовно можна поділити на електротехнічну та механічну частини. До електротехнічної частини слід віднести такі завдання, як, наприклад, вибір номінальної напруги та перерізу струмоведучої (алюмінієвої) частини проводів лінії. Завдання проектування механічної частини включають вибір перерізу сталевих частин проводів, вибір та розташування опор вздовж траси повітряної лінії тощо. Такий розподіл є досить умовним, оскільки електротехнічні параметри лінії визначають її механічну конструкцію і навпаки. Наприклад, бажана пропускна здатність лінії електропередавання визначає її номінальну напругу. Номінальна напруга визначає конструкцію опори та спосіб закріплення проводів над землею. Конструкція опори визначає взаємне розташування в просторі фазних проводів. Це визначає електротехнічні параметри лінії, зокрема її індуктивний опір та пропускну здатність.

Накопичений досвід проектування повітряних ліній електропередавання всіх класів номінальної напруги призвів до формування типових та уніфікованих рішень в конструкціях ліній електропередавання. Разом з тим, застосування новітніх технологій в конструкціях повітряних ліній, наприклад, використання проводів нового покоління, нових типів опор тощо частково, а іноді – повністю, унеможливорює розділення електричної та механічної частин проекту повітряних ліній.

Наявність типових технічних рішень, розвинутий математичний апарат та нормативна база з конструктивного виконання повітряних ліній дозволяють автоматизувати процес проектування за допомогою спеціалізованих проблемно-орієнтованих комп'ютерних систем.

Система автоматизованого проектування (САПР) – автоматизована система, яка здійснює інформаційну технологію виконання функцій проектування, результатом якої є комплект проектно-дослідницької документації, необхідної для виготовлення (будівництва) та подальшої експлуатації об'єкту проектування [35, 39, 44].

Головна мета створення та застосування САПР полягає у підвищенні ефективності інженерної праці, зокрема:

- скорочення трудомісткості проектування;
- скорочення строків проектування;
- зменшення собівартості проектування та будівництва, скорочення витрат на експлуатацію об'єкту проектування;
- підвищення якості та техніко-економічного рівня результатів проектування;
- скорочення витрат на моделювання та випробування.

Зазначені цілі досягають наступними шляхами:

- автоматизацією оформлення технічної документації;
- інформаційною підтримкою та автоматизацією процесу прийняття рішень;
- застосуванням технологій паралельного проектування;
- уніфікацією проектних рішень та процесу проектування;
- повторним використанням проектних рішень, даних та напрацювань;
- заміною натурних випробувань та макетування математичним моделюванням;
- підвищенням якості управління проектуванням;
- застосуванням методів варіативного проектування та оптимізації.

Будь-яка САПР складається з окремих підсистем – компонент, які виконують такі функції:

- *технічне забезпечення* – сукупність пов'язаних та взаємодіючих технічних засобів введення, виведення, обробки, передачі інформації тощо.
- *математичне забезпечення* – сукупність математичних методів, моделей та алгоритмів, необхідних для вирішення задач автоматизованого проектування;
- *програмне забезпечення* – сукупність програмних модулів, призначених для реалізації математичного забезпечення під час безпосереднього виконання проектних процедур, для управління компонентами технічного забезпечення та забезпечення функціонування прикладних програм;
- *інформаційне забезпечення* – сукупність відомостей, необхідних для здійснення проектування, зокрема, нормативна база правил та норм проектування, дані про типові проектні рішення, характеристики комплектуючих виробів та їх моделей тощо;

- *лінгвістичне забезпечення* – сукупність мов, які використовує САПР для подання інформації про об'єкти проектування, процеси та засоби проектування, здійснення діалогу «користувач–ЕОМ», обміну даними між технічними засобами САПР;
- *методичне забезпечення* – описи технології функціонування САПР, методів вибору та застосування користувачами технічних прийомів для отримання конкретного результату;
- *організаційне забезпечення* – сукупність документів, які визначають склад проектної організації та функції окремих підрозділів, організаційну структуру САПР, форму подання проектної документації тощо.

Сучасний ринок САПР повітряних ліній електропередавання представлений широким спектром програмних комплексів, зокрема PLS-CADD, САПР ЛЭП, Energy-CS Line, Model Studio CS ЛЭП, IndorCAD/Power, nanoCAD ЛЭП, Electra, Rubius Electric Suite та інші. На рис. 5.18 – 5.20 представлено вигляд інтерфейсних вікон деяких САПР, орієнтованих на проектування повітряних ліній електропередавання.

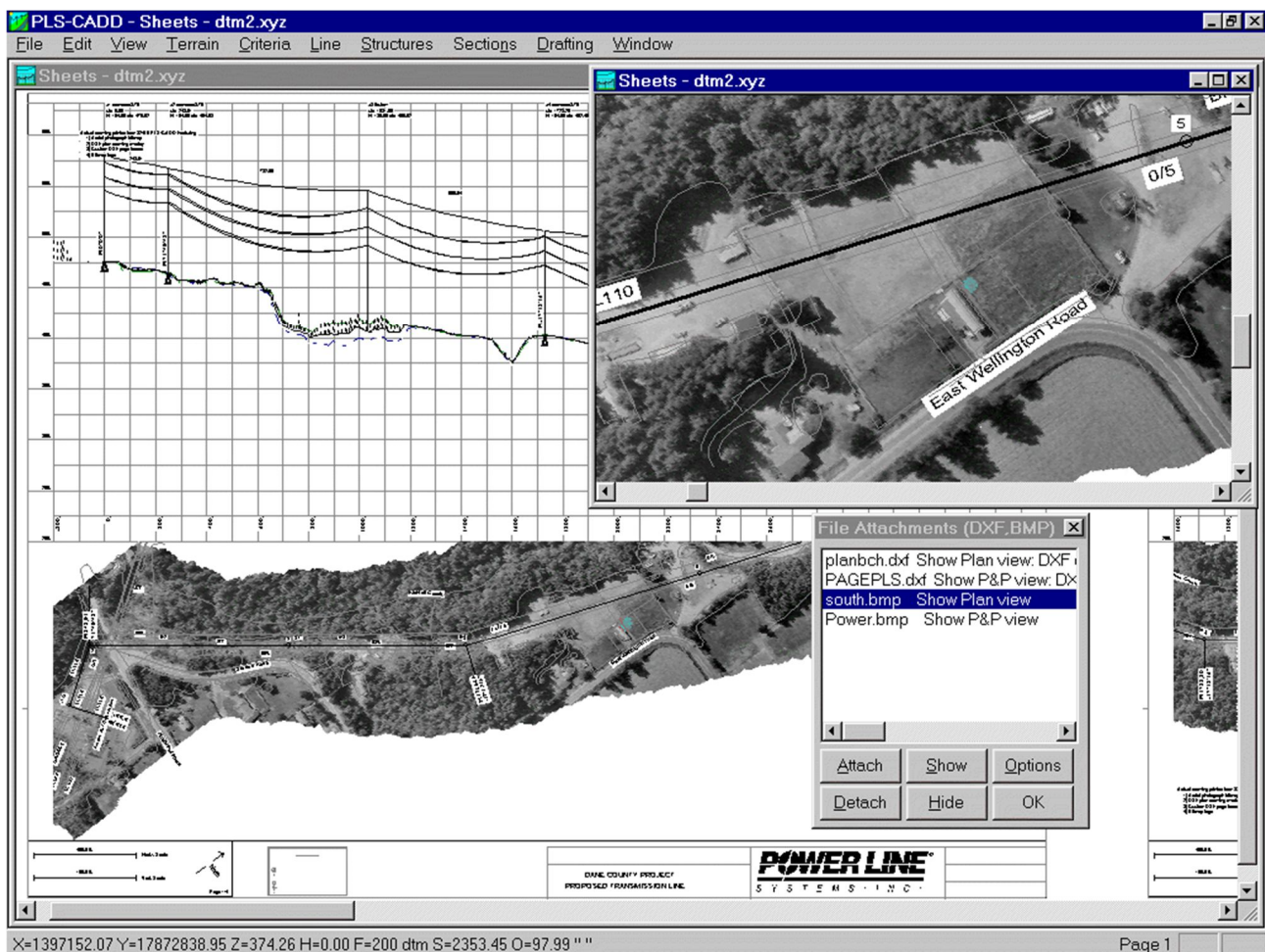


Рис. 5.18. Проектування повітряної лінії в середовищі PLS-CADD

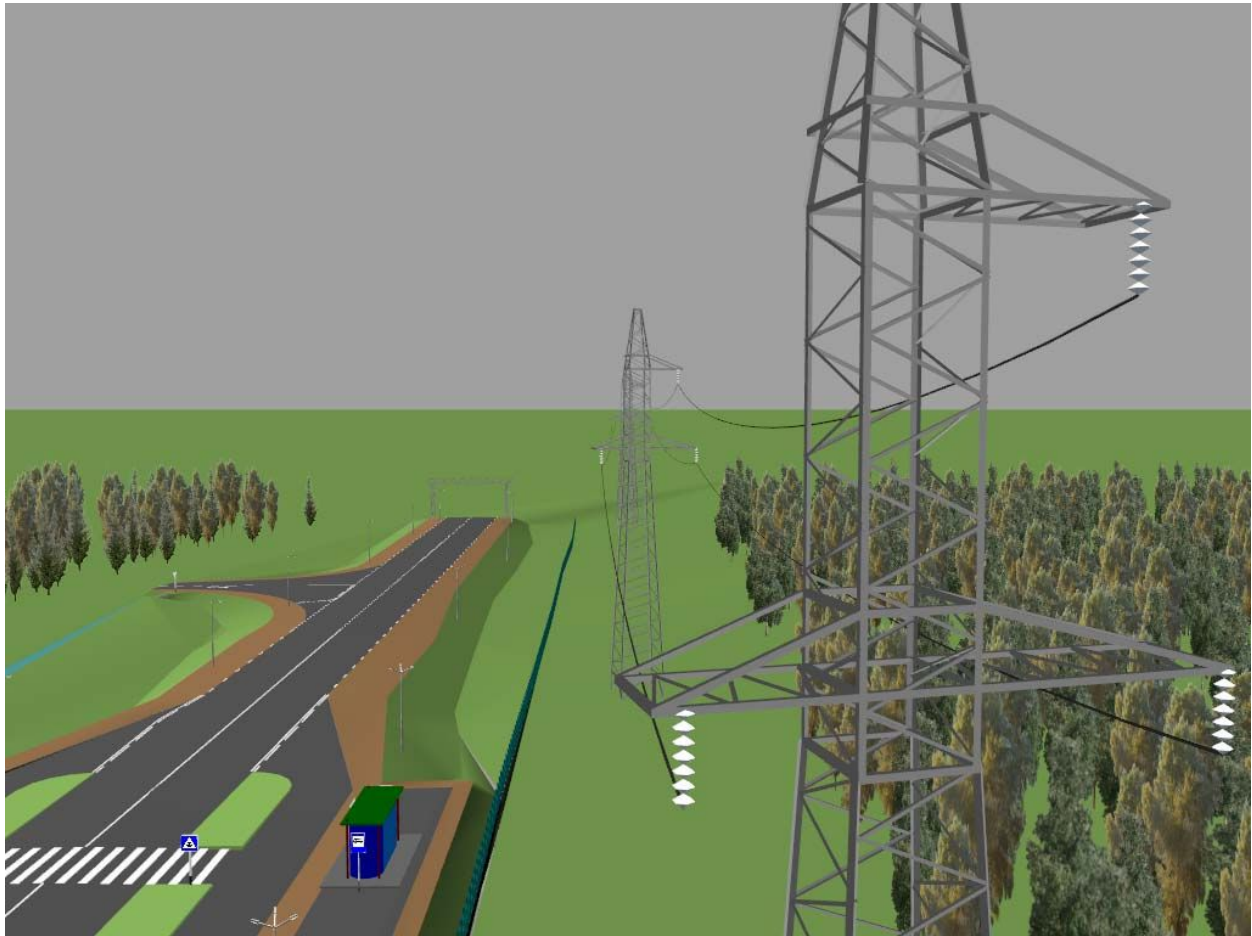


Рис. 5.19. 3D візуалізація ЛЕП в САПР IndorCAD

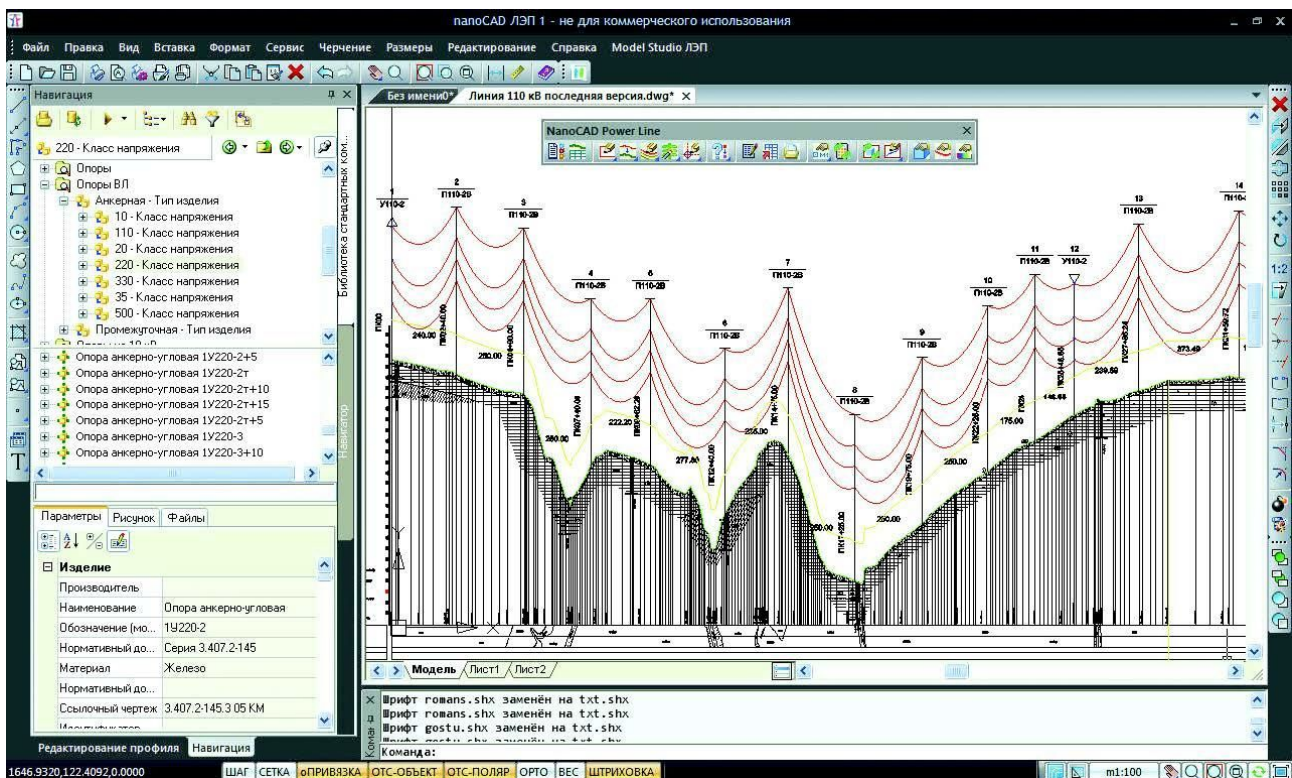


Рис. 5.20. Проектування ЛЕП напругою 110 кВ в середовищі nanoCAD

Перелік типових задач, на розв'язання яких орієнтовані дані програмні продукти включає:

- розрахунок критичних прогонів та визначення вихідного кліматичного режиму лінії;
- систематичний розрахунок проводів лінії;
- розрахунок монтажних графіків та таблиць;
- автоматичне або автоматизоване розташування опор вздовж траси лінії;
- розрахунок кривих провисання проводу, визначення габаритів;
- розрахунок навантажень на опори;
- розрахунок великих переходів;
- розрахунок фундаментів опор;
- розрахунок грозозахисних тросів;
- розрахунок ізоляційних підвісів та лінійної арматури;
- розрахунок точок закріплення віброгасників;
- розрахунок землевідведення, вирубки просік;
- розрахунок аварійних режимів конструктивних елементів повітряної лінії.

Зазначимо, що переважна більшість сучасних САПР сумісні або інтегровані в середовище AutoCAD. До додаткових можливостей деяких САПР слід віднести можливість прив'язки проекту лінії електропередавання до мап геоінформаційних систем; можливість здійснення 3D моделювання лінії тощо.

? КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. У чому полягає завдання проектування повітряної лінії електропередавання?
2. Поясніть взаємний зв'язок електричної та механічної частин проекту повітряної лінії.
3. Дайте визначення системи автоматизованого проектування.
4. Поясніть різницю між поняттями автоматизованого та автоматичного проектування.
5. У чому полягають основні цілі САПР? Яким чином досягають такі цілі?
6. Перелічіть та охарактеризуйте основні компоненти, з яких складається сучасна система автоматизованого проектування?
7. Перелічіть та охарактеризуйте типові задачі, на розв'язання яких орієнтовані системи автоматизованого проектування повітряних ліній.

Аварійний режим – режим повітряної лінії, обумовлений обривом одного чи кількох проводів або тросів, ізоляційних підвісів і тросових кріплень.

Аеродинамічний коефіцієнт – те саме, що й *коефіцієнт лобового опору*.

Анкерна опора – *опора*, призначена для натягування струмопровідних проводів та забезпечення надійності конструкції повітряної лінії в аварійних режимах.

Анкерний прогін – *прогін*, обмежений *анкерними опорами*.

Анкерована ділянка – ділянка між *анкерними опорами*, на якій встановлено *проміжні опори*.

Багатопроволочний провід – канат, скручений з окремих проволок, що забезпечує достатню механічну міцність, гнучкість та надійність конструкції.

Вага відкладень ожеледі – *характеристичне значення* навантаження від ваги відкладень ожеледі, що визначає навантаження на одиницю довжини проводу, обумовлене відкладеннями ожеледі, мокрого снігу, паморозі та інших опадів на круглому стрижні діаметром 10 мм на висоті 10 м над поверхнею землі.

Ваговий прогін – ділянка повітряної лінії ділянкою між нижніми точками провисання проводу в суміжних з опорою *прогонах*, вагу проводів (тросів) якої сприймають ізоляційний підвіс та опора. Обмеження допустимих навантажень, які можуть зазнавати контруктивні елементи опори, визначають граничні значення вагових прогонів для типових конструкцій опор повітряних ліній.

Важкодоступна місцевість – місцевість, не доступна для транспорту і сільськогосподарських машин.

Великий еквівалентний прогін – ділянка між точкою закріплення проводу на верхній відмітці та точкою на продовженні кривої провисання проводу, симетричною відносно вісі параболи (*катенарії*).

Великі переходи – перетини судноплавних ділянок рік, каналів, озер і водоймищ, на яких встановлюють опори висотою 50 м і більше, а також перетини ущелин, ярів, водних об'єктів та інших перешкод з прогоном перетину понад 700 м незалежно від висоти опор.

Виривання опори – явище, пов’язане із виникненням направленої доруги вертикальної складової рівнодіючої тяжіння проводів на опорі, розташованої нижче суміжних, викликає сідання ізоляційних підвісів та аварійне перекриття між фазним проводом та металевою траверсою опори. Для перевірки можливості виривання проводів в *режимі мінімальних температур* використовують *мінімальний шаблон* і, у разі необхідності, застосовують спеціальні заходи, направлені на запобігання виникнення такого явища.

Вихідний кліматичний режим – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого напруження проводу досягає свого гранично допустимого значення. Вихідний режим обирають серед *режимів мінімальних температур, максимальних навантажень та експлуатаційного режиму* на підставі порівняння довжини фактичного або зведеного прогону з критичними прогонами.

Вібрація проводів (тросів) – періодичні коливання проводів (тросів) в прогоні з частотою від 3 до 150 Гц, які відбуваються у вертикальній площині під час вітру і утворюють стоячі хвилі з розмахом, що може перевищувати діаметр проводів (тросів).

Вітровий прогін – ділянка повітряної лінії між серединами суміжних з опорою *прогонів* з якої навантаження від натиску вітру на проводи та троси сприймають ізоляційний підвіс та опора. Обмеження допустимих навантажень, які можуть зазнавати контруктивні елементи опори, визначають граничні значення вітрових прогонів для типових конструкцій опор.

Волоконно-оптична лінія зв’язку на повітряній лінії електропередавання – лінія зв’язку, що містить у собі волоконно-оптичний кабель, який розміщують на повітряній лінії, та волоконно-оптичні системи передавання. Оптичний кабель підвішують на опорах повітряної лінії за допомогою спеціальної арматури або навивають його на грозозахисний трос чи струмопровідний провід. Іноді використовують спеціальні конструкції струмопровідних проводів та грозозахисних тросів із вбудованими оптичними модулями.

Габарит – найменша відстань по вертикалі між нижнім проводом в прогоні та землею або інженерною спорудою під лінією електропередавання. Чинні нормативні документи обмежують габарити ліній відповідно до номінальної напруги лінії та типу місцевості в районі траси для *нормальних та аврійних режимів* лінії.

Габаритна стріла провисання – найбільша допустима *стріла провисання* за умовами забезпечення нормованих *габаритів* лінії.

Габаритний прогін – *прогін*, довжина якого визначається нормованим *габаритом* в *режимі найбільшої стріли провисання* за умови встановлення опор на горизонтальній поверхні.

Галопування проводів (тросів) – сталі періодичні низькочастотні (0,2–2 Гц) коливання проводів (тросів) в прогоні, які утворюють стоячі хвилі (іноді в сполученні з біжучими) з кількістю напівхвиль від однієї до двадцяти та амплітудою 0,3–5 м.

Гарантоване руйнівне навантаження – найменше навантаження, за якого конструкції руйнуються або незворотно змінюють свою форму.

Гнучка нитка – гнучкий елемент, який характеризується зневажливо малою жорсткістю на вигін та працює тільки на розтягування, форма якого визначається видами та місцями прикладання навантажень. Гнучки нитки служать розрахунковою моделлю несучих тросів, ланцюгів підвісних мостів, проводів та тросів повітряних ліній тощо.

Граничне розрахункове навантаження – *кліматичне навантаження*, що відповідає екстремальній ситуації, що може виникнути в середньому не більше одного разу протягом періоду експлуатації повітряної лінії. Перевищення граничного розрахункового навантаження обумовлює повну втрату працездатності конструкцій.

Граничний стан – стан, за якого конструкція перестає задовольняти заданим експлуатаційним вимогам.

Грозозахисний трос – протяжний блискавковідвід, заземлений безпосередньо або через іскрові проміжки, натягнутий вздовж повітряної лінії електропередавання над струмопровідними проводами та призначений для захисту устаткування електричної мережі від ураження блискавкою.

Деформація – зміна розмірів і форми твердого тіла під дією зовнішніх сил (навантажень) або інших впливів, наприклад, температури.

Довготривалий режим – *розрахунковий кліматичний режим* повітряної лінії, який характеризується *постійними* та *тривалими навантаженнями* на конструктивні елементи лінії. До довготривалих відносять *експлуатаційний режим* повітряної лінії.

Довжина прогону – довжина горизонтальної проекції *прогону*.

Довжина шляху витоку – найменша відстань вдовж контуру зовнішньої ізоляційної поверхні між частинами, що знаходяться під різними електричними потенціалами.

Допустиме напруження – гранично допустиме значення напруження проводу та тросу, обумовлене, з певним запасом, *межею міцності* проводу (тросу) за його розтягування. Для проводів та тросів задають два значення допустимих напружень в *короткочасних режимах мінімальних температур* та *максимальних навантажень* та *довготривалому експлуатаційному режимі*.

Другий критичний прогін – *критичний прогін*, обумовлений допустимими напруженнями проводу в режимах мінімальних температур та максимальних навантажень.

Експлуатаційний режим – *розрахунковий кліматичний режим* повітряної лінії за *середньорічної температури* без вітру.

Електромеханічна руйнівна сила – найменше значення сили, яку слід прикласти до ізолятора, що знаходиться під електричним потенціалом для його руйнації.

Епізодичне навантаження – навантаження, яке реалізується надзвичайно рідко (один чи декілька разів протягом періоду експлуатації споруди) і тривалість дії якого обмежується в часі коротким терміном. Як правило, епізодичними є навантаження в *аварійних режимах* повітряної лінії.

Закон Гука – закон, що встановлює лінійну залежність між пружними деформаціями та механічними напруженнями.

Закон лінійного теплового здовження – закон, що встановлює лінійну залежність між температурними деформаціями та зміною температури.

Зведений прогін – фіктивний еквівалентний прогін, який обумовлює таке саме *напруження* проводу, що й встановлене напруження на прогонах *анкерованої ділянки*, обумовлене *редукцією* через відхилення ізоляційних підвісів від вертикального стану.

Здовження теплове – зміна довжини проводу (тросу) внаслідок зміни його температури, обумовленої зміною температури оточуючого повітря та нагріванням проводу робочими струмами, визначається *законом лінійного теплового здовження*.

Змінне навантаження – навантаження, для якого не можна нехтувати зміною його значення у часі щодо середнього. До змінних навантажень відносять навантаження від натиску вітру на опори, проводи і троси; ваги відкладень ожеледі на проводах і тросах; додаткового натягу проводів і тросів понад їх значення за середньорічної температури; тиску води на опори і фундаменти в заплавах рік; тиску льоду; навантаження, які виникають під час виготовлення і перевезення конструкцій, а також під час монтажу конструкцій, проводів і тросів.

Ізоляційний підвіс – пристрій, що складається із одного або декількох підвісних *лінійних ізоляторів* та *лінійної арматури*, щарнірно з'єднаних між собою, призначений для підвішування та електричної ізоляції струмопровідних проводів на *опорах* повітряних ліній електропередавання.

Катенарія – плоска трансцендентна крива, форму якої приймає однорідна нерозтяжна важка *гнуčka нитка* в однорідному гравітаційному полі.

Клас безвідмовності – нормативний показчик надійності конструкції лінії електропередавання із встановленим значенням забезпеченості безвідмовної роботи механічної частини повітряної лінії під дією зовнішніх чинників протягом *розрахункового періоду експлуатації*.

Кліматичні навантаження та впливи – кліматичні умови в районі проходження траси повітряної лінії, які визначають механічні навантаження на конструктивні елементи повітряної лінії та умови її експлуатації. До кліматичних навантажень відносять навантаження від ваги відкладень ожеледі та натиску вітру. До впливів належать температура повітря в районі траси лінії, інтенсивність грозової діяльності та галоупування проводів, агресивність атмосфери. Визначаються *характеристичними значеннями* кліматичних навантажень і впливів.

Кліматичні навантаження – *змінні навантаження* на конструктивні елементи повітряної лінії, обумовлені кліматичними чинниками – натиском вітру, відкладеннями ожеледі тощо.

Коефіцієнт використання габаритного прогону дорівнює відношенню довжини середнього прогону лінії до *габаритного прогону*.

Коефіцієнт гнучкості опори – коефіцієнт, який визначає вигін опори, яка зазнає незрівноваженого тяжіння проводів (тросів) у суміжних прогонах, визначається матеріалом та конструктивним виконанням опор.

Коефіцієнт запасу міцності – мінімально допустиме відношення граничного напруження (*граничного розрахункового навантаження*) до розрахункового напруження (*розрахункового експлуатаційного навантаження*).

Коефіцієнт лінійного теплового здовження – характеристика речовини, яка визначає відносну зміну довжини тіла, наприклад, проводу або тросу, за зміни температури на один градус.

Коефіцієнт лінійного теплового здовження сталевалюмінієвого проводу – фіктивний параметр, який визначає теплове здовження *сталевалюмінієвого проводу* з урахуванням *теплового напруження* сталевих і алюмінієвих проволочок через їх жорстку скрутку.

Коефіцієнт лобового опору – емпіричний коефіцієнт, який визначає динамічну реакцію середовища на рух в ньому тіла, визначає вітрове навантаження на конструктивні елементи лінії, залежить від густини повітря, швидкості вітру, форми поверхні тіла та її шорсткості.

Коефіцієнт надійності – поправковий коефіцієнт, призначений для перерахунку *характеристичних значень* кліматичних навантажень до *розрахункових періодів повторюваності* кліматичних умов відповідно до *класу безвідмовності* повітряної лінії, визначають для розрахунку навантажень від ваги ожеледі на проводах та тросах та від натиску вітру на голі та вкриті ожеледдю проводи та троси.

Коефіцієнт редукції – відношення *редукованого тяжіння* до тяжіння в нормальному доаварійному режимі повітряної лінії

Коливання проводів після скидання ожеледі – швидкозгасаючі коливання проводів у вертикальній площині, обумовлені вивільненням енергії деформації проводу після скидання ожеледі на великих ділянках лінії.

Комбінований провід – *багатопроволочний провід*, скручений з проволок різних металів, наприклад, *сталеалюмінієвий провід*.

Компактний провід – те саме, що й *провід нового покоління*.

Коронне галопування проводів – коливання проводів з частотою 0,2-2 Гц та амплітудою 0,3-2,7 м обумовлені переходом енергії електричних розрядів під час коронування в кінетичну енергію коливань проводів.

Короткочасне навантаження – *змінне навантаження*, яке реалізується багато разів протягом періоду експлуатації споруди і для якого тривалість дії набагато менша від *розрахункового періоду експлуатації* конструкції.

Короткочасний режим – *розрахунковий кліматичний режим* повітряної лінії, який характеризується *короткочасними навантаженнями* та впливами на конструктивні елементи лінії. До короткочасних режимів відносять *режими мінімальних та максимальних температур, максимальної ожеледі, максимального вітру та вітру під час ожеледі*.

Критична температура – температура навколишнього середовища, за якого *стріла провисання* проводу така сама, що й в *режимі максимальної ожеледі*. Порівняння критичної температури із характеристичним значенням *максимальної температури* дозволяє визначити кліматичний режим *максимальної стріли провисання*.

Критичний прогін – фіктивний прогін, в якому *напруження* проводу досягає *допустимих* значень у порівнюваних *розрахункових кліматичних режимах*. Розрізняють *перший, другий та третій* критичні прогони. Порівняння довжин критичних прогонів між собою та з довжиною фактичного (*зведеного*) *прогону* визначає *вихідний кліматичний режим*.

Ланцюгова лінія – те саме, що й *катенарія*.

Лінійна арматура – сукупність пристроїв, призначених для монтажу та захисту проводів та тросів повітряних ліній.

Лінійний ізолятор – пристрій, призначений для закріплення та електричної ізоляції струмопровідних проводів на *опорах* повітряних ліній електропередавання.

Лінія електропередавання – інженерна споруда, призначена для передавання та розподілу електричної енергії по струмопровідних проводах на віддалену відстань.

Максимальна температура – *характеристичне значення* кліматичного впливу на конструктивні елементи повітряної лінії, дорівнює середньостатистичній найбільшій півгодинній температурі протягом року, зафіксованій на метеостанції в районі проходження траси повітряної лінії.

Малий еквівалентний прогін – ділянка між точкою закріплення проводу на нижній відмітці та точкою на кривій провисання проводу, симетричною відносно вісі параболи (*катенарії*).

Межа міцності – умовне механічне *напруження*, яке відповідає зусиллю, направленому на деформацію проводу (тросу) під час його розтягування, що призводить до поділу зразка на частини.

Метод граничних станів – метод розрахунку будівельних конструкцій, що передбачає встановлення системи розрахункових коефіцієнтів, які враховують особливості роботи конструкції, забезпечують її надійність та гарантують ненастання *граничних станів*, за яких конструкція перестає задовольняти заданим експлуатаційним вимогам. За методом граничних станів проводять розрахунки опор та фундаментів повітряних ліній електропередавання.

Метод допустимих напружень – метод забезпечення механічної міцності конструкції в умовах експлуатації, полягає у встановленні гранично *допустимих напружень*, менших за *межу міцності* з певним *коефіцієнтом запасу*. За методом механічних напружень виконують механічні розрахунки проводів та тросів повітряних ліній.

Метод руйнівних навантажень – метод забезпечення механічної міцності конструкції, який полягає у зіставленні робочих навантажень на конструктивні елементи повітряної лінії з *гарантованим руйнівним навантаженням* із урахуванням нормованих значень *коефіцієнтів запасу міцності*. За методом руйнівних навантажень здійснюють розрахунки ізоляційних підвісів та лінійної арматури.

Механічна руйнівна сила – найменше значення сили, яку слід прикласти до ізолятора для його руйнації.

Мінімальна температура – *характеристичне значення* кліматичного впливу на конструктивні елементи повітряної лінії, дорівнює середньостатистичній найменшій півгодинній температурі протягом року, зафіксованій на метеостанції в районі проходження траси повітряної лінії.

Мінімальний шаблон – шаблон, який відповідає кривій провисання проводу в *режимі мінімальних температур*, призначений для перевірки виникнення явища *виривання опор*.

Модуль пружності – величина, що характеризує пружні властивості матеріалу за малих деформацій. Дорівнює відношенню *напруження* до

викликаной нею пружної відносної деформації. Розрізняють три типи модулів пружності: за осового розтягу-стискання (*модуль Юнга*, або модуль нормальної (поздовжньої) пружності); за зсуву (модуль зсуву); за об'ємного стискання (модуль об'ємної пружності).

Модуль пружності сталевалюмінієвого проводу – фіктивний параметр, який визначає пружне розтягування сталевалюмінієвого проводу з урахуванням перерозподілу тяжіння між сталевими та алюмінієвими проволочками через їх жорстку скрутку.

Модуль Юнга – *модуль пружності* першого роду, або модуль нормальної (поздовжньої) пружності за осового розтягу/стиску – фізична величина, що характеризує пружні властивості ізотропних речовин.

Монтажна таблиця – таблиця, яка відображає залежність *стріли провисання* проводу (тросу) від температури повітря в *монтажному режимі* для різних прогонів.

Монтажний графік – графік, який відображає залежність *стріли провисання* проводу від температури повітря в *монтажному режимі* для різних прогонів.

Монтажний режим – режим повітряної лінії в умовах монтажу опор, проводів та тросів.

Напруження (механічне напруження) – міра інтенсивності внутрішніх сил, розподілених по перетинах проводу (тросу), тобто *тяжіння*, що припадає на одиницю площі перерізу проводу (тросу).

Населена місцевість – сельбіщна територія міського та сільського поселень у межах їх перспективного розвитку на десять років, курортні та приміські зони, зелені зони навколо міст та інших населених пунктів, землі селищ міського типу і сільських населених пунктів у межах їх сельбіщної території, виробничі території, а також території садово-городніх ділянок.

Ненаселена місцевість – землі, не віднесені до *населеної місцевості*.

Нормальний режим – режим експлуатації повітряної лінії за умови необірваних проводів, ізоляційних підвісів та тросових кріплень.

Одиничне навантаження – рівномірно розподілене навантаження на проводи та троси повітряної лінії, віднесені до одиниці довжини проводу (тросу).

Опора – будівельна конструкція, призначена для утримання проводів та грозозахисних тросів над землею та забезпечення нормованого взаємного розташування струмопровідних проводів та тросів.

Опорний лінійний ізолятор – ізолятор, який використовують як жорстку опору для струмопровідних елементів повітряної лінії.

Основні сполучення навантажень – сполучення навантажень або відповідних їм зусиль і/або переміщень для перевірки конструкцій в стабільних і в перехідних розрахункових ситуаціях.

Перехід – перетинання повітряною лінією інженерних споруд – шосейних доріг, залізниць, ліній електропередавання та зв'язку тощо.

Перший критичний прогін – *критичний прогін*, обумовлений *допустимими напруженнями* проводу в *режимах мінімальних температур* та *експлуатаційному*.

Питоме навантаження – відношення *одиночного навантаження* на проводи та троси повітряної лінії до площі поперечного перерізу проводу (тросу).

Підвісний ізолятор – лінійний ізолятор, призначений для рухомого закріплення струмопровідних елементів до несучих конструкцій.

Повітряна лінія електропередавання – пристрій, призначений для передавання та розподілу електричної енергії по струмопровідним проводам, розташованим просто неба та закріпленим за допомогою *траверс, ізоляційних підвісів* та *лінійної арматури* на *опорах* або інших спорудах.

Повітряна лінія із захищеними проводами – *повітряна лінія електропередавання із самоутримними ізольованими проводами*, у яких поверх струмопровідної жили накладено екструдовану полімерну захисну ізоляцію, що унеможливорює коротке замикання між проводами в разі їх доторкання та зменшує ймовірність замикання на землю.

Поздовжній профіль траси – образ вертикального розрізу вздовж траси повітряної лінії, побудований на підставі результатів топографічних вимірювань, використовують для визначення місць розташування опор вздовж траси лінії і перевірки дотримання габаритів між проводами лінії і землею та інженерними спорудами.

Порожнистий провід – неізольований провід трубчастої форми, виконаний з одного повиву плоских алюмінієвих проволочок спіральної форми, зчеплених між собою в замок за допомогою пазів. Конструкція порожнистих проводів забезпечує зниження втрат енергії на корону через збільшення діаметру проводу без невиправданого збільшення витрат металу.

Постійне навантаження – навантаження, яке діє практично не змінюючись протягом *розрахункового періоду експлуатації* лінії електропередавання і для якого можна нехтувати зміною його значення у часі щодо середнього. До постійних відносять навантаження, обумовлені вагою будівельних конструкцій, проводів, тросів та устаткування повітряних ліній; натягом проводів і тросів за середньорічної температури повітря і відсутності вітру та ожеледі; вагою і тиском ґрунтів; тиском води на фундаменти в руслах рік, а також попереднім напруженням конструкцій.

Провід нового покоління – інноваційні конструкції неізолюваних термостійких проводів збільшеної механічної міцності, підвищеної пропускну здатності із захистом від відкладень ожеледі тощо.

Прогін – ділянка між *опорами* будь-якого типу або спорудами, які заміщують опори.

Проміжна опора – *опора*, призначена лише для підтримки струмопровідних проводів та тросів над землею.

Пружна деформація – *деформація*, що не викликає незворотні зміни у структурі тіла, після зняття *напруження* тіло повертає собі попередні розміри й форму.

Редуковане тяжіння – усталене тяжіння проводу, обумовлене *редукцією*.

Редукція – зміна тяжіння проводу (тросу) через переміщення однієї з точок його закріплення.

Режим вітру під час ожеледі – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого повітряна лінія зазнає найбільших навантажень від натиску вітру на проводи (троси), вкриті ожеледдю.

Режим максимальних навантажень – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого провід (трос) зазнає найбільших *одиничних (питомих) навантажень*. Відповідно до співвідношення характеристик проводу (тросу) та кліматичних умов в районі траси повітряної лінії режимом максимальних навантажень може бути один з наступних: *режим максимальної ожеледі, режим максимального вітру, режим вітру під час ожеледі*.

Режим максимального вітру – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого провід (трос) зазнає найбільших навантажень від натиску вітру.

Режим максимальної ожеледі – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого провід (трос) зазнає найбільших навантажень від ваги відкладень ожеледі.

Режим максимальної стріли провисання – *розрахунковий кліматичний режим*, за якого *стріла провисання* проводу (тросу) досягає своїх найбільших значень. Критерієм визначення режиму максимальної стріли провисання є *критична температура*.

Режим максимальної температури – *розрахунковий кліматичний режим* повітряної лінії за найбільшої (*максимальної*) *температури* в районі траси лінії.

Режим мінімальної температури – *розрахунковий кліматичний режим* повітряної лінії за найнижчої (*мінімальної*) *температури* в районі траси лінії.

Розбивний шаблон – шаблон, за допомогою якого здійснюють проектне розташування опор вздовж траси повітряної лінії. Складається з трьох кривих максимального провисання проводу, зсунутих одна від іншої по вертикалі на відстані, які визначаються висотою закріплення проводу на опорі та нормованою габаритною відстанню між проводом та землею або інженерною спорудою. Верхня крива розбивного шаблону відображає положення проводу в *режимі максимальної стріли провисання*. Середня крива (габаритна) призначена для контролю дотримання нормованих габаритних відстаней. Нижню криву (земляну) використовують для визначення місць розташування опор на *поздовжньому профілі траси* повітряної лінії.

Розрахункове експлуатаційне навантаження – *кліматичне навантаження*, що характеризує умови нормальної експлуатації конструкції повітряної лінії. Перевищення експлуатаційного розрахункового навантаження обумовлює часткову втрату працездатності конструкцій, наприклад, виникнення неприпустимих габаритів струмопровідних проводів, неприпустимих переміщень конструкцій, розкриття тріщин тощо.

Розрахунковий кліматичний режим – кліматичні умови в районі траси лінії, які визначають умови механічного розрахунку конструкції повітряної лінії з метою контролю дотримання вимог щодо електричної та механічної міцності конструкції, безпеки експлуатації, грозозахисту тощо. До основних розрахункових кліматичних режимів віднесено *експлуатаційний режим, режими максимальної та мінімальної температури, максимальної ожеледі, вітру та вітру під час ожеледі*.

Розрахунковий період експлуатації – нормативний показник, який визначає період, протягом якого повітряна лінія має виконувати свої функції без зниження працездатності.

Самоутримний ізольований провід – провід, який складається із скручених в джгут алюмінієвих ізольованих жил однакового перерізу. Ізоляція жил виконана з світлостабілізованого поліетилену високого тиску чорного кольору, стійкого до впливу ультрафіолетового випромінювання. Для забезпечення необхідної механічної міцності проводу одна або всі жили містять сталеве осереддя.

Середній період повторюваності – статистична величина, що визначає середній інтервал повторення граничних та експлуатаційних *кліматичних навантажень та впливів*.

Середньорічна температура – *характеристичне значення* кліматичного впливу на конструктивні елементи повітряної лінії, дорівнює середньстатистичному значенню середньозваженої за тривалістю температури протягом року в районі проходження траси повітряної лінії.

Система автоматизованого проектування – автоматизована комп'ютерна система, яка здійснює інформаційну технологію виконання функцій

проектування, результатом роботи якої є комплект проектно-дослідницької документації, необхідної для виготовлення (будівництва) та подальшої експлуатації об'єкту проектування.

Систематичний розрахунок повітряної лінії – механічний розрахунок конструкції повітряної лінії у *розрахункових кліматичних режимах* з метою контролю допустимості механічних навантажень на конструктивні елементи повітряної лінії, дотримання нормованих ізоляційних проміжків та габаритних відстаней тощо.

Сталеалюмінієвий провід – *комбінований провід*, який складається із сталевого осереддя, яке забезпечує необхідну механічну міцність конструкції та зовнішнього алюмінієвого шару, призначеного для забезпечення необхідної електричної провідності.

Стріла провисання – відстань по вертикалі між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів (тросів) на суміжних опорах та проводом у середині прогону. Інколи стрілу провисання визначають як відстань по вертикалі між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та нижньою точкою провисання проводу в прогоні.

Субколивання проводів – періодичні коливання проводів розщепленої фази у разі, коли один з проводів пучку знаходиться в аеродинамічному сліді іншого проводу.

Температура в режимі ожеледі – температура повітря в режимі утворення максимальних відкладень ожеледі на конструктивних елементах повітряної лінії. Для умов України дорівнює -5°C .

Температура вітрового режиму – температура повітря у режимі найбільшого навантаження від натиску вітру. Для умов України дорівнює *температурі в режимі ожеледі*.

Температура грозового періоду – граничне значення температури, за якої ймовірна грозова активність. Для умов України дорівнює $+15^{\circ}\text{C}$.

Температурний коефіцієнт лінійного здовження – те саме, що й *коефіцієнт лінійного теплового здовження*.

Теплове напущення – внутрішні напруження між сталевими та алюмінієвими проволочками *сталеалюмінієвих проводів*, обумовлене різними значеннями *коефіцієнтів лінійного теплового здовження* сталевих та алюмінієвих проволочок, яке виникає під час нагівання (охолодження) проводу.

Тимчасовий опір руйнуванню – те саме, що й *межа міцності за розтягування*.

Товщина стінки ожеледі – *характеристичне значення* навантаження від ваги відкладень ожеледі, яке визначає навантаження на поводи та троси лінії, обумовлене відкладеннями ожеледі, мокрого снігу, паморозі та

інших опадів густиною 900 кг/м^3 у формі ідеального циліндру на круглому стрижні діаметром 10 мм на висоті 10 м над поверхнею землі.

Траверса – поперечна балка для кріплення ізоляторів у верхній частині *опори* повітряної лінії.

Третій критичний прогін – *критичний прогін*, обумовлений *допустимими напруженнями* проводу в *експлуатаційному* та *режимі максимальних навантажень*.

Тривале навантаження – *змінне навантаження*, тривалість дії якого може наближатися до *розрахункового періоду експлуатації* конструкції.

Тросове кріплення – пристрій для прикріплення *грозозахисних тросів* до *опори*. Якщо до складу тросового кріплення входить один або декілька ізоляторів, то його називають ізолювальним.

Тяжіння – сила, направлена на розтягування проводу (тросу), яка виникає внаслідок дії на провід (трос) власної ваги та зовнішніх навантажень, зокрема, ваги ожеледі та натиску вітру. Тяжіння рівномірно розподілене вздовж довжини проводу (тросу) та направлене за дотичною до кривої провисання у кожній точці проводу (тросу). Горизонтальна складова вектору тяжіння однакова для всіх точок проводу у прогоні. Вертикальна складова тяжіння обумовлена вагою відрізка проводу між нижньою точкою провисання проводу та поточною точкою. Свого найбільшого значення ветрикальна складова та тяжіння проводу в цілому набуває в точках закріплення проводу на опорі.

Фундамент опори – контрукція, забита в ґрунт, призначена для передавання на ґрунтову основу навантаження від опори, ізоляційних підвісів, лінійної арматури, проводів та зовнішніх впливів.

Характеристичне значення – середнє значення параметрів *кліматичних навантажень та впливів* за періоду повторюваності 50 років. До характеристичних значень кліматичних навантажень та впливів відносять *вагу відкладень та товщину стінки ожеледі, швидкісний натиск вітру, мінімальну, максимальну та середньорічну температури* повітря в районі траси лінії.

Характеристичні значення навантаження від відкладень ожеледі – *вага відкладень ожеледі*, мокрого снігу, паморозі та інших опадів та *товщина стінки ожеледі* на круглому стрижні діаметром 10 мм, розташованому на висоті 10 м над поверхнею землі за середнього переоду повторюваності кліматичних умов 50 років.

Швидкісний натиск вітру – *характеристичне значення* навантаження від натиску вітру, який визначає динамічний вплив потоку повітря та вітрове навантаження на конструктивні елементи повітряної лінії. Вимірю-

ється для рівнинної місцевості на висоті 10 м над поверхнею земні за середнього періоду повторюваності 50 років. Розрізняють характеристичні значення навантажень від натиску вітру в *режимах максимального вітру та вітру під час ожеледі*.

Штировий ізолятор – *лінійний ізолятор*, який складається з ізоляційної деталі, що закріплюється на штирі або гаку опори.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Баласт, 160, 198
- Близкавказист, 17, 152
- Виривання опори, 196
- Висота розташування центру мас, 95
- Вібрація проводів (тросів), 51
 - еолова, 51
- Відкладення ожеледі, 46
- Габарит, 11
- Галопування проводів (тросів), 51
 - коронне, 55
- Гасник вібрації, 56, 163
 - – петльового типу, 163
 - – спірального типу, 164
 - – Стокбріджа, 164
 - галопування, 56
- Гірлянди ізоляторів, 37
- Гнучка нитка, 70
- Граничні стани другої групи, 111
 - – першої групи, 111
- Ділянка анкерована, 11
- Довжина проводу, 92
 - прогону, 10
- Закон Гука, 58
- Здовження пружне, 58, 127, 174
 - теплове, 59, 127
- Ізолятори лінійні, 35, 155
 - опорні, 38
 - підвісні, 37
 - полімерні, 38
 - стрижневі, 38
 - тарільчасті, 37
 - штирьові, 37
- Ізоляційні підвіси, 37, 155
 - натяжні, 39
 - підтримуючі, 39
- Катенарія, 73
- Клас безвідмовності, 107
- Коефіцієнт аеродинамічний, 118
 - використання габаритного прогону, 186
 - висоти розташування проводу, 120
 - гнучкості опори, 172
 - динамічності натиску вітру, 119
 - довжини прогону, 120
 - запасу міцності, 109, 110
 - лінійного здовження температурний, 59
 - – сталевалюмінієвого проводу, 64
 - лобового опору, 118
 - надійності, 108
 - – за вітровим навантаженням, 119
 - – – під час ожеледі, 121
 - – за ожеледним навантаженням, 115
 - напряду вітру, 120
 - нерівномірності натиску вітру, 120
 - редукції, 172
 - рельєфу, 120
 - розташування проводів, 119
- Коливання проводів, 51
 - після скидання ожеледі, 54
- Крива габаритна, 189
 - земляна, 189
 - провисання проводу (тросу), 70, 188
- Кут атаки вітру, 118
 - захисту лінії, 152
- Ланцюгова лінія, 73
- Лінійна арматура, 40
 - для самоутримних проводів, 42
 - з'єднувальна, 42
 - захисна, 42
 - зчеплювальна, 40
 - контактна, 42
 - натяжна, 42
 - підтримуюча, 42
- Лінія зв'язку волоконно-оптична на повітряній лінії електропередавання, 19
- Лінія повітряна із захищеними проводами, 21
- Маркування ізоляторів, 39
 - опор, 32
 - проводів, 21
- Масштаб мінімального шаблону, 197
 - розбивного шаблону, 187
 - поздовжнього профілю вертикальний, 183
 - – горизонтальний, 183
- Межа міцності за розтягування, 109
- Метод граничних станів, 111
 - допустимих напружень, 109, 134
 - руйнівних навантажень, 110
- Модуль пружності, 58
 - сталевалюмінієвого проводу, 60
 - Юнга, 58

Монтажні графіки, 205

- таблиці, 207

Навантаження аварійні, 106

- вертикальні, 112, 166
- від ваги ізоляційних підвісів, 167
- від ваги ожеледі на проводах (тросах), 112
- від власної ваги опори, 167
- від власної ваги проводу (тросу), 112
- від натиску вітру на проводи (троси), 117
- від натиску вітру на проводи (троси), вкриті ожеледдю, 121
- від натягу проводів та тросів, 167
- гарантоване руйнівне, 110, 158
- горизонтальні, 112, 166
- граничне розрахункове, 107
- експлуатаційне розрахункове, 107
- епізодичні, 106
- змінні, 106, 167
- кліматичні, 106
- короткочасні, 106, 168
- монтажні, 167
- на ізоляційні підвіси, 156
- на опору, 166
- одиничні, 70
- питомі, 70
- постійні, 106, 167
- сумарне від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю, 117
- сумарне від ваги проводу (тросу) та натиску вітру, 122
- сумарне від ваги проводу (тросу), вкритого ожеледдю та натиску вітру, 122
- тривалі, 106

Напруження, 58

- допустиме, 109
- проводу в точці закріплення, 87
- теплове, 64

Натиск вітру, 50

- – швидкісний, 118
- – – під час ожеледі, 121

Опори, 24

- анкерні, 9, 27
- дерев'яні, 24
- з вертикальним розташуванням проводів, 31

- з горизонтальним розташуванням проводів, 31
- з композитних матеріалів, 27
- залізобетонні, 27
- зі змішаним розташуванням проводів, 32
- металеві, 27
- – багатогранні, 27
- – решітчасті, 27
- проміжні, 9, 27
- спеціальні, 28
- – відпайкові, 28
- – кінцеві, 28
- – кутові, 28
- – перехідні, 28
- – транспозиційні, 28

Переходи, 200

Період експлуатації розрахунковий, 106

- повторюваності кліматичних навантажень середній, 107

Поздовжній профіль траси, 183

Провід багатопроволочний, 14

- комбінований, 15
- компактний, 19
- нового покоління, 179
- порожнистий, 17
- самоутримний ізольований, 21
- сталевалюмінієвий, 15, 59
- суміщений з опто-волоконним кабелем, 19

Прогін, 10

- анкерний, 10
- ваговий, 156, 187
- вітровий, 156, 187
- габаритний, 185
- еквівалентний, 79, 191
- – великий, 80
- – малий, 79
- зведений, 132
- критичний, 134
- – другий, 135
- – перший, 137
- – третій, 139

Редукція, 130, 171

Режим аварійний, 148, 171

- вітру під час ожеледі, 150
- горозового періоду, 151
- експлуатаційний, 149
- кліматичний вихідний, 134
- – розрахунковий, 149
- максимальних навантажень, 123

- максимального вітру 150
- максимальної ожеледі, 150
- максимальної стріли провисання, 146, 188
- максимальної температури, 150
- мінімальної температури, 150
- монтажний, 149
- нормальний, 148
- Рівняння ланцюгової лінії, 73
 - стану проводу у прогоні, 128, 132
- Розпорки всереденіфазні, 56
 - міжфазні, 56
- Руйнівна сила електромеханічна, 155
 - – механічна, 155
- Система автоматизованого проектування повітряної лінії, 208
- Систематичний розрахунок проводів та тросів, 151
- Стріла провисання, 11, 78
 - габаритна, 97
 - максимальна, 146, 188
- Субколювання проводів, 53
- Схеми опор розрахункові, 168
- Температура вітрового режиму, 45
 - грозового періоду, 46
 - критична, 146
 - максимальна, 45
 - мінімальна, 45
 - під час ожеледі, 45
 - середньорічна, 45
- Тимчасовий опір руйнуванню, 109
- Тип місцевості, 119
- Товщина стінки ожеледі, 112
- Трос грозозахисний, 17, 152
 - суміщений з оптоволоконним кабелем, 19
- Тягіння, 68, 85
 - в точці закріплення проводу, 87
 - вертикальне 71, 86
 - горизонтальне, 71, 86
 - редуковане, 130, 171
- Фундаменти опор, 34
- Характеристичні значення кліматичних навантажень та впливів, 107
 - навантаження від ваги ожеледі, 114
 - навантаження від натиску вітру, 118
 - – – під час ожеледі, 122
 - температурних режимів, 45
- Центр мас проводу, 95
- Шаблон мінімальний, 197
 - розбивний, 187

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аеродинаміка електромережних конструкцій / за ред. Є. В. Горохова; [Є. В. Горохов, М. І. Казакевич, С. М. Шаповалов, Я. В. Назім]. – Донецьк, 2000. – 336 с. – ISBN 966-7477-19-3.
2. Андриевский В. Н. Эксплуатация воздушных линий электропередачи / под ред. А. С. Зеличенко; [В. Н. Андриевский, А. Т. Голованов, А. С. Зеличенко]. – Москва: Энергия, 1976. – 616 с.
3. Барг И. Г. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности / И. Г. Барг, В. И. Эдельман. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
4. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода (теоретические основы кабелей и проводов, их расчёт и конструкции) / Н. И. Белоруссов. – Москва: Энергия, 1971. – 512 с.
5. Беляев Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – Москва: Наука, 1976. – 607с.
6. Боровиков В. А. Электрические сети и системы. Учеб. Пособие для техникумов / В. А. Боровиков, В. К. Косарев, Г. А. Ходот. – Ленинград: Энергия, 1968. – 392 с.
7. Бошнякович А. Д. Механический расчёт проводов и тросов линий электропередачи / А. Д. Бошнякович. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. – 254 с.
8. Бошнякович А. Д. Расчет проводов подстанций и больших переходов ЛЭП / А. Д. Бошнякович. – Ленинград: Энергия, 1975. – 248 с.
9. Бутенин Н. В. Курс теоретической механики. Том 1. Статика и кинематика / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – Москва: Наука, 1979. – 272 с.
10. Бухарин Е. М. Проектирование опор линий электропередачи / Е.М. Бухарин, Ю. А. Габля, Л. Э. Левин. – Москва: Энергия, 1971. – 210 с.
11. Бухарин Е. М. Проектирование фундаментов опор линий электропередачи / под ред. Л. Э. Левина; [Е. М. Бухарин, Ю. А. Габля, Л. Э. Левин]. – Москва: Энергия, 1971. – 216 с.
12. Виноградов Д. Е. Монтаж опор линий электропередачи 110–750 кВ / Д. Е. Виноградов. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с. – ISBN 5-283-04404-1.
13. Выбор и изыскания трасс воздушных линий электропередачи / под редакцией Ю.Н. Шумихина; [Ю. Н. Шумихин, В. И. Лебедев, А. Л. Куклинский та ін.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 182 с.

14. ГІД 34.20.501-2008 Розрахунок опор і проводів повітряних ліній електропередавання згідно з вимогами глави 2.4 ПУЕ: 2006 і глави 2.5 ПУЕ: 2006 Посібник
15. ГКД 34.20.175-2002. Вимоги до проектування повітряних ліній електропередачі напругою до 1 кВ з самоутримними ізольованими проводами
16. Глазунов А. А. Основы механической части воздушных линий электропередачи / А. А. Глазунов. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. – 192 с.
17. Глазунов А. А. Электрические сети и системы: Учебное пособие для вузов / А. А. Глазунов, А. А. Глазунов. – Москва, Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 368 с.
18. Гологорский Е. Г. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ / под ред. Е. Г. Гологорского; [Е. Г. Гологорский, А. Н. Кравцов, Б. М. Узелков]. – Москва: ЭНАС, 2007. – 560 с. – ISBN 978-5-93196-733-2.
19. ГОСТ 839-80 Провода неизолированные для воздушных линий электропередач. Технические условия. Межгосударственный стандарт
20. Дарков А. В. Сопротивление материалов / А. В. Дарков, Г. С. Шпиро – Москва: Высшая школа, 1975. – 654 с.
21. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України – К., 2006 – 75 с.
22. ДСТУ 2648-94 Ізолятори електротехнічні. Терміни та визначення
23. ДСТУ 3429-96 Електрична частина електростанції та електричної мережі. Терміни та визначення
24. ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні. Терміни та визначення
25. ДСТУ 3465-96 Системи електропостачальні загального призначення. Терміни та визначення
26. ДСТУ 3857-99 Арматура лінійна. Терміни та визначення
27. Дядищев Б. А. Справочник по эксплуатации и ремонту высоковольтных линий электропередачи / Б. А. Дядищев, П. И. Хоменко. – Київ: Техніка, 1984. – 192 с.
28. Зеличенко А. С. Проектирование механической части воздушных линий сверхвысокого напряжения / А. С. Зеличенко, Б. И. Смирнов. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
29. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов / В. И. Идельчик. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с. – ISBN 5-283-01012-0.
30. Имшеницкий В. Н. Сельские электрические сети / В. Н. Имшеницкий, С. М. Рожавский. – Москва: Колос, 1970. – 392 с.

31. Кесельман Л. М. Основы механики воздушных линий электропередачи / Л. М. Кесельман. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 352 с. – ISBN 5-283-01209-3.
32. Короткевич М. А. Проектирование линий электропередачи. Механическая часть / М. А. Короткевич. – Минск: Высшая школа, 2010. – 574 с. – ISBN 978-985-06-1700-2.
33. Крюков К. П. Переходы воздушных линий через большие водные пространства / К. П. Крюков. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1982. – 224с.
34. Крюков К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюков, Б. П. Новгородцев. – Ленинград: Энергия, 1979. – 312 с.
35. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – С.Пб.: Питер, 1996. – 559 с
36. Магазинник Л. Т. Монтаж линий электропередач самонесущими изолированными проводами / Л. Т. Магазинник. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 77 с. – ISBN 5-89146-628-7.
37. Магидин Ф. А. Сооружение воздушных линий электропередачи / Ф. А. Магидин. – Москва: Высшая школа, 1978. – 320 с.
38. Магидин Ф. А. Устройство и монтаж воздушных линий электропередачи. Учеб. Пособие для проф.-техн. учеб. заведений и подгот. рабочих на производстве / Ф. А. Магидин, А. Г. Берковский. – Москва: Высш. школа, 1973. – 255 с.
39. Малюх В. Н. Введение в современные САПР / В. Н. Малюх. – Москва: ДМК-Пресс, 2010. – 192с.
40. Мильніков О. В. Опір матеріалів / О. В. Мильніков. – Тернопіль: Видавництво ТДТУ імені Івана Пулюя, 2005. – 212 с.
41. Миронов Е. П. Пляска проводов на воздушных линиях / Е. П. Миронов. – Москва: Госэнергоиздат, 1955. – 53 с.
42. Нарожний Б. В. Кліматичні навантаження на повітряні лінії електромереж / Б. В. Нарожний. – Київ: Енергопрогрес, 1994. – 212 с.
43. Павловський М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ: Техніка, 2002. – 510 с.
44. Павлюков В. А. Учебная САПР электрической части станций и подстанций / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко, А. В. Коваленко. – Харьков: ФЛП Панов Ф. Н. – 124 с.
45. Підвищення надійності та довговічності електромережних конструкцій / за ред. Є. В. Горохова; [Є. В. Горохов, С. М. Шаповалов, Є. І. Удод та ін.]. – К.: Техніка, 1997. – 284 с. – ISBN 966-575-001-1
46. Посацький С. Л. Опір матеріалів / С. Л. Посацький. – Львів: Видавництво Львівського університету, 1973. – 403 с.

47. Правила улаштування електроустановок. – Харків: Видавництво Форт, 2017. – 760 с.
48. Розанов Г. М. Некоторые вопросы расчета механической части воздушных линий / Г. М. Розанов. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1954. – 224 с.
49. Рябков А. Я. Электрические сети и системы / А. Я. Рябков. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1960. – 511 с.
50. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник / М. С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с. – ISBN 978-966-553-602-4.
51. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007 Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Інструкція з експлуатації
52. СОУ-Н ЕЕ 20.579:2009 Кліматичні дані для визначення навантажень на повітряні лінії електропередавання. Методика опрацювання
53. СОУ-Н ЕЕ 20.667:2007 Кліматичні навантаження на повітряні лінії електропередавання з урахуванням топографічних особливостей. Методика
54. СОУ-Н ЕЕ 21.262:2008 Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж. Інструкція. – Київ: НТСЕУ, ОЕП «ГРІФРЕ», 2008. – 36 с.
55. СОУ-Н ЕЕ 21.262:2008 Кліматичне забезпечення будівництва та експлуатації електричних мереж. Інструкція
56. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-62:2012 Проектування електричних мереж з урахуванням протиожеледових заходів
57. Справочник по проектированию линий электропередачи / под ред. М. А. Реута и С. С. Рокотяна. – Москва: Энергия, 1980. – 296 с.
58. Справочник по проектированию электрических сетей [Текст] / под ред. Д. Л. Файбисовича. – Москва: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2005. – 320 с. – ISBN 5-93196-542-4.
59. Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей / под ред. Я. М. Большама, В. И. Круповича, М.Л. Самовера. – Москва: Энергия, 1975. – 696 с.
60. Справочник по строительству линий электропередачи / под ред. А. Д. Романова. – Москва: Энергия, 1971. – 560 с.
61. Сулейманов В.Н. Електричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. Київ: НТУУ "КПІ", 2008. - 456 с. ISBN 978-966-622-300-8
62. Шевченко Е. В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи / Е. В. Шевченко. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – 169 с. – ISBN 966-7477-11-8.

-
63. Электрические системы и сети: учеб. / Н. В. Буслова, В. Н. Винославский, Г. И. Денисенко, В. С. Перхач; под. ред. Г. И. Денисенко. – Киев: Вища шк., 1986. – 584 с.
 64. Электрические системы. Т2. Электрические сети: Учеб. пособие для электроэнерг. вузов / под ред. В. А. Веникова. – Москва: Высш. школа, 1971. – 440 с.
 65. Atmospheric Icing of Power Networks / edit by Dr. Masoud Farzaneh. – Springer Science, 2008, 388 p. – ISBN 978-1-4020-8530-7
 66. Kiessling, Friedrich. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction / Friedrich Kiessling, Peter Nefzger, Joao F. Nolasco, Ulf Kaintzyk. – Springer, 2003, 759 p. – ISBN 3-540-00297-9
 67. Bayliss C. Transmission and Distribution Electrical Engineering / Colin Bayliss, Brian Hardy. – Elsevier, 2006. – 1040 p. – ISBN: 978-0-7506-6673-2.
 68. Das D. Electrical Power Systems / D. Das. – New Delhi: New Age International Publishers, 2006. – 470 p. – ISBN: 978-81-224-2515-4.
 69. Grigsby L. L. Electric Power Generation. Transmission and Distribution / Leonard L. Grigsby. – CRC Press, 2007. – 502 p. – ISBN: 978-0-8493-9292-4.
 70. Grigsby L. L. The Electric Power Engineering. Handbook / Leonard L. Grigsby. – CRC Press, 2001. – 950 p. – ISBN: 0-8493-8578-4.

ДОДАТОК А. ДОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Таблиця А.1. Розрахункові дані проводів із алюмінію та алюмінієвих сплавів марок А, АН, АЖ

| Номиналь- ний переріз | Переріз, мм^2 | Діаметр проводу, мм | Маса про- воду без мастила кг/км |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| 16 | 15,9 | 5,1 | 43,0 |
| 25 | 24,9 | 6,4 | 68,0 |
| 35 | 34,3 | 7,5 | 94,0 |
| 50 | 49,5 | 9,0 | 135,0 |
| 70 | 69,3 | 10,7 | 189,0 |
| 95 | 92,4 | 12,3 | 252,0 |
| 120 | 117,0 | 14,0 | 321,0 |
| 150 | 148,0 | 15,8 | 406,0 |
| 185 | 182,8 | 17,5 | 502,0 |
| 240 | 238,7 | 20,0 | 655,0 |
| 300 | 288,3 | 22,1 | 794,0 |
| 350 | 345,8 | 24,2 | 952,0 |
| 400 | 389,2 | 25,6 | 1072,0 |
| 450 | 448,1 | 27,3 | 1206,0 |
| 500 | 500,4 | 29,1 | 1378,0 |
| 550 | 544,0 | 30,3 | 1500,0 |
| 600 | 586,8 | 31,5 | 1618,0 |
| 650 | 641,7 | 32,9 | 1771,0 |
| 700 | 691,7 | 34,2 | 1902,0 |
| 750 | 747,4 | 35,6 | 2062,0 |

Таблиця А.2. Відношення площ поперечного перерізу сталевалюмінієвих проводів

| Район за ожеледдю | Переріз алюмінію, мм^2 | Відношення площ поперечного перерізу А:С |
|-------------------|------------------------------------|---|
| ➤ 1–3 | до 240 | 6,0÷6,25 |
| | більше 240 | 7,5 і більше |
| ➤ 4–6 | до 95 | до 6,0 |
| | 120÷400 | 4,0÷4,5 |
| | більше 400 | 7,5÷8 |
| | більше 400 на великих переходах | 0,5÷2,5 |

Таблиця А.3. Розрахункові дані сталевалюмінієвих проводів марки АС

| Номіналь- ний переріз | Переріз, мм ² | | Діаметр, мм | | Маса про- воду без мастила кг/км |
|------------------------------------|--------------------------|-------|-------------|-----------------------|---|
| | алюміній | сталь | проводу | сталевого осереддя | |
| Зі співвідношенням А:С = 6,0 | | | | | |
| 16/2,7 | 16,0 | 2,69 | 5,6 | 1,9 | 64,9 |
| 25/4,2 | 24,9 | 4,15 | 6,9 | 2,3 | 100,3 |
| 35/6,2 | 36,9 | 6,15 | 8,4 | 2,8 | 148,0 |
| 50/8,0 | 48,2 | 8,04 | 9,6 | 3,2 | 195,0 |
| 70/11 | 68,0 | 11,3 | 11,4 | 3,8 | 276,0 |
| 95/16 | 95,4 | 15,9 | 13,5 | 4,5 | 385,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 6,11÷6,28 | | | | | |
| 120/19 | 118,0 | 18,8 | 15,2 | 5,6 | 471,0 |
| 150/24 | 149,0 | 24,2 | 17,1 | 6,3 | 599,0 |
| 185/29 | 181,0 | 29,0 | 18,8 | 6,9 | 728,0 |
| 240/39 | 236,0 | 38,6 | 21,6 | 7,2 | 952,0 |
| 300/48 | 295,0 | 47,8 | 24,1 | 8,9 | 1186,0 |
| 400/64 | 390,0 | 63,5 | 27,7 | 10,2 | 1572,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 4,29÷4,39 | | | | | |
| 120/27 | 114,0 | 26,6 | 15,4 | 6,6 | 528,0 |
| 150/34 | 147,0 | 34,3 | 17,5 | 7,5 | 675,0 |
| 185/43 | 185,0 | 43,1 | 19,6 | 8,4 | 846,0 |
| 240/56 | 241,0 | 56,3 | 22,4 | 9,6 | 1106,0 |
| 300/66 | 288,5 | 65,8 | 24,5 | 10,5 | 1313,0 |
| 400/93 | 406,0 | 93,2 | 29,1 | 12,5 | 1851,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 7,71÷8,04 | | | | | |
| 150/19 | 148,0 | 18,8 | 16,8 | 5,6 | 554,0 |
| 185/24 | 187,0 | 24,2 | 18,9 | 6,3 | 705,0 |
| 240/32 | 244,0 | 31,7 | 21,6 | 7,2 | 921,0 |
| 300/39 | 301,0 | 38,6 | 24,0 | 8,0 | 1132,0 |
| 330/43 | 332,0 | 43,1 | 25,2 | 8,4 | 1255,0 |
| 400/51 | 394,0 | 51,1 | 27,5 | 9,2 | 1490,0 |
| 500/64 | 490,0 | 63,5 | 30,6 | 10,2 | 1852,0 |
| 600/72 | 580,0 | 72,2 | 33,2 | 11,0 | 2170,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 1,46 | | | | | |
| 185/128 | 187,0 | 128,0 | 23,1 | 14,7 | 1525,0 |
| 300/204 | 298,0 | 204,0 | 29,2 | 18,6 | 2428,0 |
| 500/336 | 490,0 | 336,0 | 37,5 | 23,9 | 4005,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 0,65 | | | | | |
| 70/72 | 68,4 | 72,2 | 15,4 | 11,0 | 755,0 |
| Зі співвідношенням А:С = 0,95 | | | | | |
| 95/141 | 91,2 | 141,0 | 19,8 | 15,4 | 1357,0 |

Таблиця А.4. Фізико-механічні характеристики проводів і тросів

| Проводи і троси | Модуль пружності <i>ГПа</i> | Температурний коефіцієнт лінійного здовження $10^{-6} \text{ град}^{-1}$ | Межа міцності під час розтягування <i>МПа</i> |
|--|---------------------------------|---|--|
| Алюмінієві | 63 | 23,0 | 160 |
| З нетермообробленого алюмінієвого сплаву | 63 | 23,0 | 208 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву | 63 | 23,0 | 285 |
| Сталеалюмінієві з відношенням площ поперечного перерізу А:С | | | |
| 20,27 | 70,4 | 21,5 | 210 |
| 16,87–17,82 | 70,4 | 21,2 | 220 |
| 11,51 | 74,5 | 21,0 | 240 |
| 7,71–8,04 | 77,0 | 19,8 | 270 |
| 6,0–6,28 | 82,5 | 19,2 | 290 |
| 4,29–4,39 | 89,0 | 18,3 | 340 |
| 2,34 | 103 | 16,8 | 460 |
| 1,46 | 114 | 15,5 | 565 |
| 0,95 | 134 | 14,5 | 690 |
| 0,65 | 134 | 14,5 | 780 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям з відношенням площ поперечного перерізу А:С | | | |
| 1,71 | 116,5 | 15,83 | 620 |
| 1,46 | 120 | 15,5 | 650 |
| Сталеві проводи | 200 | 12,0 | 620 |
| Сталеві троси | 185 | 12,0 | 1200 |
| Захищені проводи | 62,5 | 23,0 | 294 |
| Компактні проводи марок Aero-Z, AFLs, HVCRC | за технічними умовами виробника | | |

Таблиця А.5. Фізико-механічні характеристики грозозахисних тросів

| Марка троса | | ТК-35 | ТК-50 | ТК-70 |
|--|--|-------|-------|-------|
| Діаметр, мм | | 8,0 | 9,1 | 11,0 |
| Розрахунковий перетин, мм ² | | 38,01 | 48,64 | 72,58 |
| Вага кг/км | | 330 | 401 | 623 |
| Коефіцієнт пружності 10^3 МПа | | 200 | 200 | 200 |
| Коефіцієнт теплового здовження 10^{-6} 1/град | | 12,0 | 12,0 | 12,0 |
| Допустиме механічне напруження $\sigma_{\text{доп}}$, МПа | за найбільшого навантаження та мінімальної температури | 600 | 600 | 600 |
| | за середньорічної температури | 420 | 420 | 420 |

Таблиця А.6. Допустимі механічні напруження в проводах і тросах

| Проводи і троси | Допустиме механічне напруження $\sigma_{\text{доп}}$, МПа | |
|---|--|-------------------------------|
| | за найбільшого навантаження та мінімальної температури | за середньорічної температури |
| Алюмінієві перетином, мм ² : | | |
| 70–95 | 56 | 48 |
| 120–240 | 64 | 51 |
| 300–750 | 72 | 51 |
| З нетермообробленого алюмінієвого сплаву перетином, мм ² : | | |
| 50–95 | 83 | 62 |
| 120–185 | 94 | 62 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву перетином, мм ² : | | |
| 50–95 | 114 | 85 |
| 120–185 | 128 | 85 |
| Сталеалюмінієві перетином алюмінієвої частини проводу, мм ² : | | |
| 35–95 при А:С від 5,99 до 6,02 | 120 | 90 |
| 70 при А:С 0,95 | 272 | 204 |
| 95 при А:С 0,65 | 308 | 231 |
| 120 і більше при А:С від 4,29 до 4,38 | 153 | 102 |
| 150–800 при А:С від 7,8 до 8,04 | 126 | 84 |
| 185 і більше при А:С від 6,14 до 6,28 | 135 | 90 |
| 185, 300 і 500 при А:С 1,46 | 254 | 169 |
| 330 при А:С 11,51 | 117 | 78 |
| 400 і 500 при А:С 20,27 і 18,87 | 104 | 69 |
| 400, 500 і 1000 при А:С 17,91; 18,08 і 17,85 | 96 | 64 |
| 500 при А:С 2,43 | 205 | 137 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям перетином алюмінієвої частини, мм ² : | | |
| 70 при А:С 1,71 | 279 | 186 |
| 500 при А:С 1,46 | 292 | 195 |
| Сталеві проводи | 310 | 216 |
| Сталеві линви | згідно стандартів та технічних умов | |
| Захищені проводи | 114 | 85 |
| Компактні проводи марок Aero-Z, AFLs, HVCRC | за технічними умовами виробника | |

Таблиця А.7. Мінімально допустимі перерізи проводів повітряних ліній за умовами механічної міцності

| Характеристика повітряної лінії | Переріз проводів, мм ² | | | |
|---|--|--|------------------|----------|
| | Алюмінієвих і з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | з термообробленого алюмінієвого сплаву | сталеалюмінієвих | сталевих |
| Повітряні лінії без перетинів у районах за ожеледдю: | | | | |
| ➤ 1–2 | 70 | 50 | 35/6,2 | 35 |
| ➤ 3–4 | 95 | 50 | 50/8 | 35 |
| ➤ 5 і вище | – | 70 | 70/11 | 35 |
| Перетини повітряних ліній із судноплавними річками та інженерними спорудами в районах за ожеледдю | | | | |
| ➤ 1–2 | 70 | 50 | 50/8 | 35 |
| ➤ 3–4 | 95 | 70 | 50/8 | 50 |
| ➤ 5 і вище | – | 70 | 70/11 | 50 |
| Повітряні лінії до 20 кВ, які споруджують на двоколових та багатоколових опорах | – | 70 | 70/11 | – |

Таблиця А.8. Кількість і переріз проводів повітряних ліній

| Номінальна напруга лінії, кВ | Номінальний переріз проводу за алюмінієм, мм ² | Мінімальна кількість проводів у фазі |
|------------------------------|---|--------------------------------------|
| 35 ¹ | 70–95 | 1 |
| 35 | 120 | 1 |
| 110 ² | 120 | 1 |
| 110, 150 | 240 | 1 |
| 220 | 400 | 1 |
| 330 | 400 | 2 |
| 400 | 400 | 2 |
| 500 | 300 | 3 |
| 750 | 400 | 5 |

¹ Стосується ліній напругою 35 кВ, які є відгалуженням від існуючих магістральних ліній з перерізом проводів 70-95 мм² або продовженням таких магістралей

² Стосується ліній напругою 110 кВ для живлення електроспоживачів потужністю до 20 МВт

Таблиця А.9. Довжини прогонів, за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Площа поперечного перерізу ³ , мм ² | Довжина прогону, м, у місцевості типу | |
|---|---|---------------------------------------|-----------|
| | | I, II | III, IV |
| Сталеалюмінієві, з термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям і без нього, захищені проводи | 35–95 | понад 80 | понад 95 |
| | 120–240 | понад 100 | понад 120 |
| | 300 і більше | понад 120 | понад 145 |
| Алюмінієві, та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | 50–95 | понад 60 | понад 95 |
| | 120–240 | понад 100 | понад 120 |
| | 300 і більше | понад 120 | понад 145 |
| Сталеві | 25 і більше | понад 120 | понад 145 |

Таблиця А.10. Механічні напруження проводів і тросів в експлуатаційному режимі, за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Механічні напруження, МПа, у місцевості типу | |
|--|--|-----------|
| Сталеалюмінієві марок АС за відношення А/С | I, II | III, IV |
| ➤ 0,65÷0,95 | понад 70 | понад 85 |
| ➤ 1,46 | понад 60 | понад 70 |
| ➤ 4,29÷4,39 | понад 45 | понад 55 |
| ➤ 6,0÷8,05 | понад 40 | понад 45 |
| ➤ 11,5 і більше | понад 35 | понад 40 |
| Алюмінієві, та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | понад 35 | понад 40 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям і без нього | понад 40 | понад 45 |
| Сталеві | понад 170 | понад 195 |

Таблиця А.11. Механічні напруження розщеплених проводів і тросів з двох складників в експлуатаційному режимі, за яких необхідний захист від вібрації

| Проводи і троси | Механічні напруження, МПа, у місцевості типу | |
|--|--|-----------|
| Сталеалюмінієві марок АС за відношення А/С | I, II | III, IV |
| ➤ 0,65÷0,95 | понад 75 | понад 85 |
| ➤ 1,46 | понад 65 | понад 70 |
| ➤ 4,29÷4,39 | понад 50 | понад 55 |
| ➤ 6,0÷8,05 | понад 45 | понад 50 |
| ➤ 11,5 і більше | понад 40 | понад 45 |
| Алюмінієві, та з нетермообробленого алюмінієвого сплаву | понад 40 | понад 45 |
| З термообробленого алюмінієвого сплаву зі сталевим осереддям і без нього | понад 45 | понад 50 |
| Сталеві | понад 195 | понад 215 |

³ Для сталеалюмінієвих проводів – перерізи алюмінієвої частини

Таблиця А.12. Найменші відстані між тросом і проводом всередині прогону

| Довжина прогону, м | Найменша відстань між тросом і проводом по вертикалі, м | Довжина прогону, м | Найменша відстань між тросом і проводом по вертикалі, м |
|--------------------|---|--------------------|---|
| 100 | 2,0 | 700 | 11,5 |
| 150 | 3,2 | 800 | 13,0 |
| 200 | 4,0 | 900 | 14,5 |
| 300 | 5,5 | 1000 | 16,0 |
| 450 | 7,0 | 1200 | 18,0 |
| 500 | 8,5 | 1500 | 21,0 |
| 600 | 10,0 | | |

Таблиця А.13. Найменші ізоляційні відстані по повітрю від струмопровідних до заземлених частин опори (см)

| Розрахункова умова | Номинальна напруги лінії, кВ | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 10 | 20 | 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Грозові перенапруги для ізоляторів: | | | | | | | | | |
| – штирових | 15 | 25 | 35 | | | | | | |
| – підвісних | 20 | 35 | 40 | 100 | 130 | 180 | 260 | 320 | |
| Внутрішні перенапруги | 10 | 15 | 30 | 80 | 110 | 160 | 215 | 300 | 450 |
| Робоча напруга | – | 7 | 10 | 25 | 35 | 55 | 80 | 115 | 160 |

Таблиця А.14. Найменші відстані між фазними проводами на опорі (см)

| Розрахункова умова | Номинальна напруги лінії, кВ | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 10 | 20 | 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Грозові перенапруги | 20 | 45 | 50 | 135 | 175 | 250 | 310 | 400 | |
| Внутрішні перенапруги | 22 | 33 | 44 | 100 | 140 | 200 | 280 | 420 | 640 |
| Робоча напруга | 10 | 15 | 20 | 45 | 60 | 95 | 140 | 200 | 280 |

Таблиця А.15. Найменші відстані від проводів повітряної лінії до поверхні землі, будівель та споруд

| Характеристика місцевості | Напруга лінії, кВ | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | до 35 | 110 | 150 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Нормальний режим | | | | | | | |
| Населена: – до поверхні землі | 7 | 7 | 7,5 | 8 | 8 | 8 | 12 |
| – до будівель та споруд | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 8 | 12 |
| Ненаселена | 6 | 6 | 6,5 | 7 | 7,5 | 8 | 12 |
| Важкодоступна | 5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 7 | 10 |
| Недоступні гірські схили, скелі тощо | 3 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 7,5 |
| Аварійний режим | | | | | | | |
| Населена: – до поверхні землі | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | – | – | – |

Таблиця А.16. Характеристики полімерних ізоляторів

| Тип ізоляторів | Номінальна напруга лінії, кВ | Механічне руйнівне навантаження, кН | Геометричні розміри, мм | | | | Вага, кг | Витримувана напруга, кВ | |
|----------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------|-------------------------|------------------------|
| | | | Будівельна висота | Ізоляційна висота | Діаметр ребра | Довжина шляху витоку | | Грозового імпульсу | Комутаційного імпульсу |
| ЛК 70/35-3 | 35 | 70 | 592 | 358 | 90 | 900 | 1,8 | 230 | – |
| ЛК70/110-3 | 110 | 70 | 1248 | 1008 | 90 | 2640 | 3,65 | 570 | 480 |
| ЛК70/220-3 | 220 | 70 | 2098 | 1858 | 90 | 4800 | 5,6 | 1050 | 820 |
| ЛК70/330-3 | 330 | 70 | 2880 | 2640 | 90 | 6700 | 7,7 | 1370 | 1160 |
| ЛК160/220-3 | 220 | 160 | 2125 | 1835 | 110 | 4680 | 9,1 | 1000 | 850 |
| ЛК160/330-3 | 330 | 160 | 2973 | 2693 | 110 | 7200 | 12,4 | 1400 | 1150 |
| ЛК160/500-3 | 500 | 160 | 3894 | 3551 | 110 | 9500 | 16,0 | 1740 | 1450 |
| ЛК300/330-3 | 330 | 300 | 2998 | 2586 | 130 | 6850 | 17,5 | 1350 | 1100 |
| ЛК300/500-3 | 500 | 300 | 3844 | 3432 | 130 | 9130 | 21,8 | 1730 | 1300 |
| ЛК300/500-А3 | 500 | 300 | 3995 | 3585 | 130/95 | 11100 | 22,8 | 1800 | 1500 |
| ЛК600/330-3 | 330 | 600 | 3140 | 2660 | 150/120 | 7200 | 31,2 | 1440 | 1030 |

Таблиця А.17. Характеристики підвісних тарілчастих ізоляторів

| Тип ізоляторів | Механічне руйнівне навантаження, кН | Геометричні розміри, мм | | | Вага, кг | Витримувана напруга, кВ | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|----------|-------------------------------|-----------|----------------------|
| | | Діаметр тарілки | Будівельна висота | Довжина шляху витoku | | Промислової частоти під дощем | Імпульсна | За рівнем радіозавад |
| Скляні ізолятори нормального використання | | | | | | | | |
| ПС 40 | 40 | 175 | 110 | 185 | 1,7 | 30 | 70 | 25 |
| ПС 70Е | 70 | 255 | 127/146 | 303 | 3,4 | 40 | 100 | 25 |
| ПС 120Б | 120 | 255 | 127/146/170 | 320 | 3,9 | 40 | 100 | 30 |
| ПС 160Д | 160 | 280 | 146/170 | 370 | 6,2 | 45 | 110 | 35 |
| ПС 210Б | 210 | 300 | 170/195 | 370 | 7,1 | 45 | 110 | 40 |
| ПС 300Б | 300 | 320 | 195 | 385 | 10,0 | 50 | 130 | 40 |
| ПС 400Б | 400 | 390 | 205/220 | 475 | 15,0 | 55 | 130 | 40 |
| Скляні ізолятори для районів із забрудненою атмосферою | | | | | | | | |
| ПСД 70Е | 70 | 270 | 127 | 411 | 4,6 | 45 | 110 | 25 |
| ПСВ 120Б | 120 | 290 | 146 | 442 | 5,7 | 50 | 125 | 30 |
| ПСВ 160 | 160 | 320 | 146/170 | 545 | 8,5 | 55 | 140 | 20 |
| Скляні ізолятори спеціального призначення | | | | | | | | |
| ПСС 120Б | 120 | 330 | 127/146 | 330 | 5,0 | 45 | 75 | 30 |
| ПСС 210Б | 210 | 410 | 156 | 410 | 9,0 | 55 | 90 | 40 |
| ПСК 300А | 300 | 450 | 180 | 460 | 12,4 | 52 | 90 | 40 |

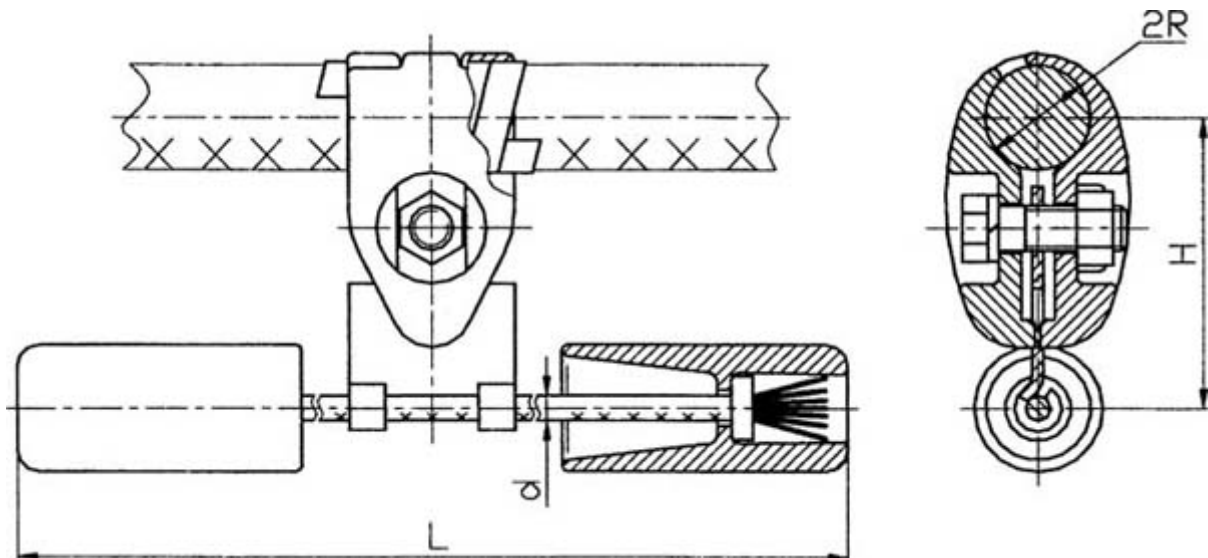


Рис. А.1. Конструкція гасника вібрації типу ГВН

Таблиця А.18. Лінійні гасники вібрації типу ГВН

| Тип | Марка та переріз проводів та тросів | | | | Геометричні розміри, мм | | | | Вага, кг |
|----------|-------------------------------------|---------------|--|--------|-------------------------|----|-----|-------|----------|
| | М | А | АС | С | d | 2R | L | H | |
| ГВН-2-9 | — | — | — | 35, 50 | 9,1 | 10 | 300 | 82,5 | 2,32 |
| ГВН-2-13 | 70 | 70, 95 | 70/11, 95/16 | — | | 10 | 350 | 83,5 | 2,37 |
| ГВН-3-12 | 95 | — | — | 70 | 11,0 | 13 | 400 | 81,0 | 4,28 |
| ГВН-3-13 | — | — | — | 95 | | | 450 | | 4,31 |
| ГВН-3-17 | 120, 150 | 120, 150, 185 | 70/72, 120/19, 120/27, 150/19, 150/24, 150/34 | — | | 16 | — | 84 | 4,33 |
| ГВН-4-14 | — | — | — | 120 | | 13 | 440 | 81 | 5,91 |
| ГВН-4-22 | 185, 240 | 240, 300 | 185/24, 185/29, 185/43, 205/27, 240/32, 240/39, 240/56 | — | | 20 | 490 | 87 | 5,98 |
| ГВН-5-25 | 300, 350, 400 | 350, 400 | 300/39, 300/48, 300/66, 300/67, 330/30, 330/43 | — | 13 | 23 | 550 | 96,5 | 7,96 |
| ГВН-5-30 | — | 450, 500, 550 | 400/22, 400/51, 400/64, 400/93, 450/56, 400/18, 500/26, 500/27, 500/64 | — | | 31 | — | 100,5 | 8,02 |
| ГВН-5-34 | — | 600, 650, 700 | 550/71, 600/72, 650/79 | — | | 35 | 600 | 101,5 | 8,07 |
| ГВН-5-38 | — | 750 | 700/86, 750/93 | — | | 38 | 650 | 103,5 | 8,12 |

ДОДАТОК Б. КЛІМАТИЧНЕ РАЙОНУВАННЯ
ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

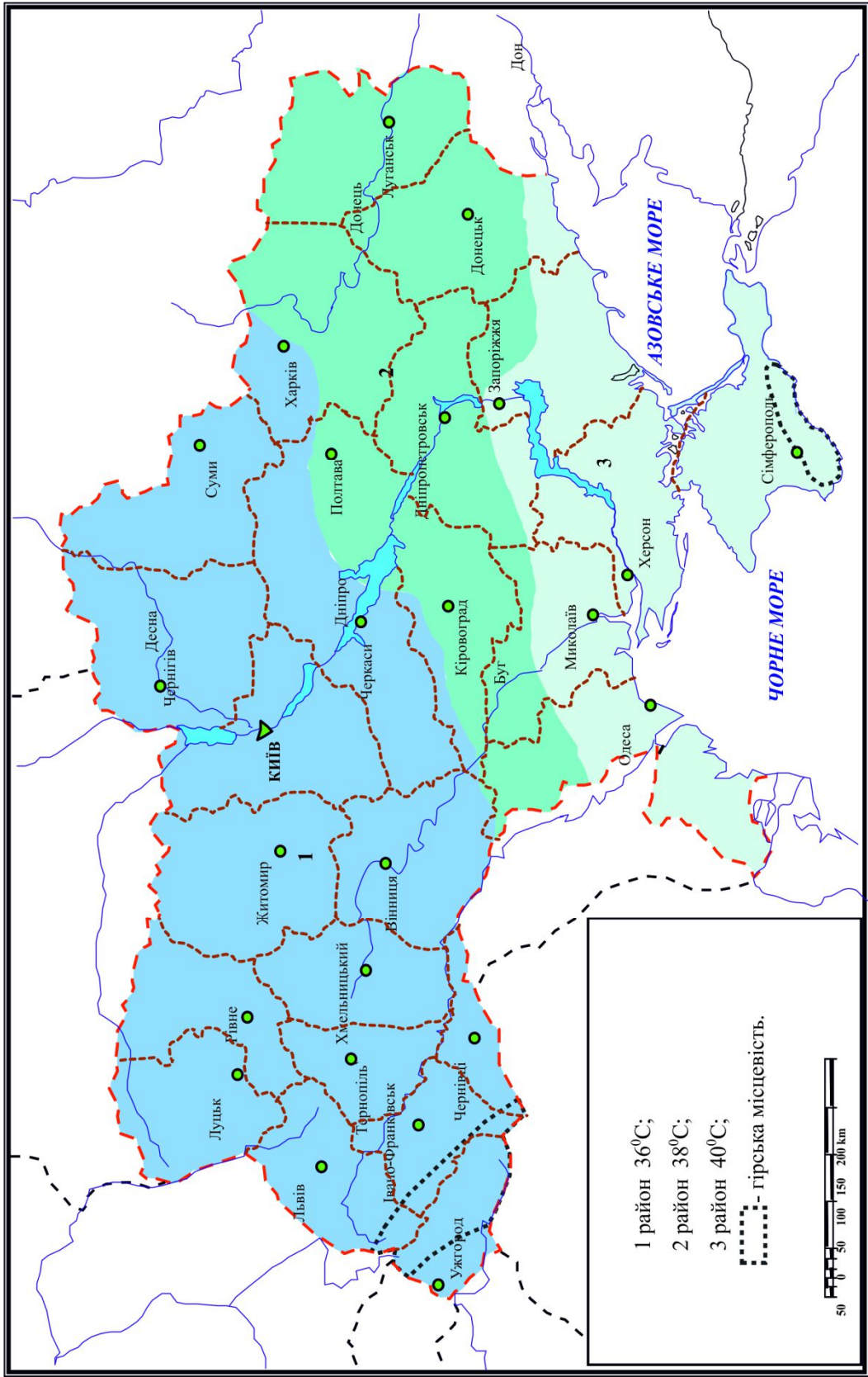


Рис. Б.1. Районування території України за максимальною температурою повітря

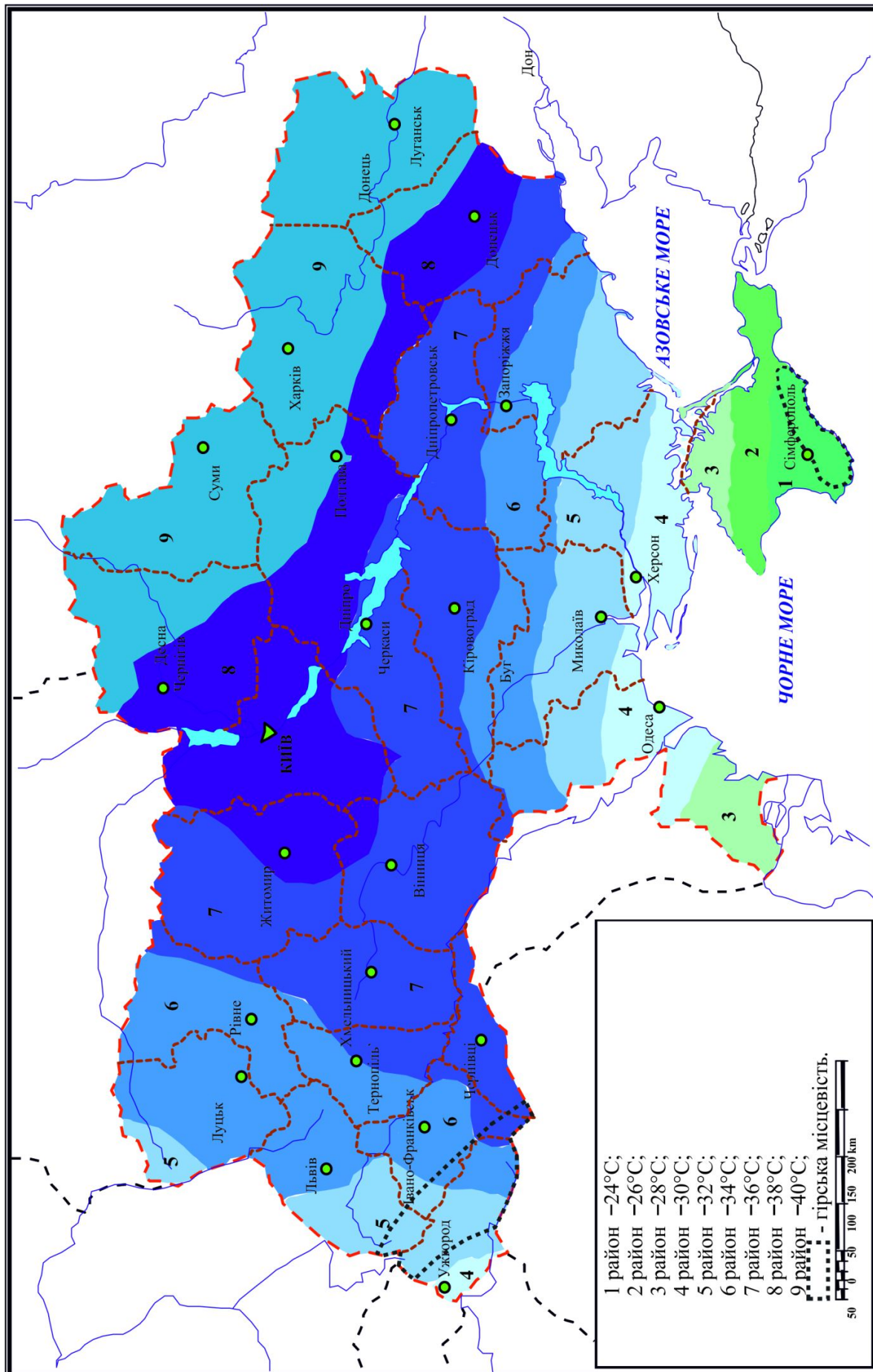


Рис. Б.2. Районування території України за мінімальною температурою повітря

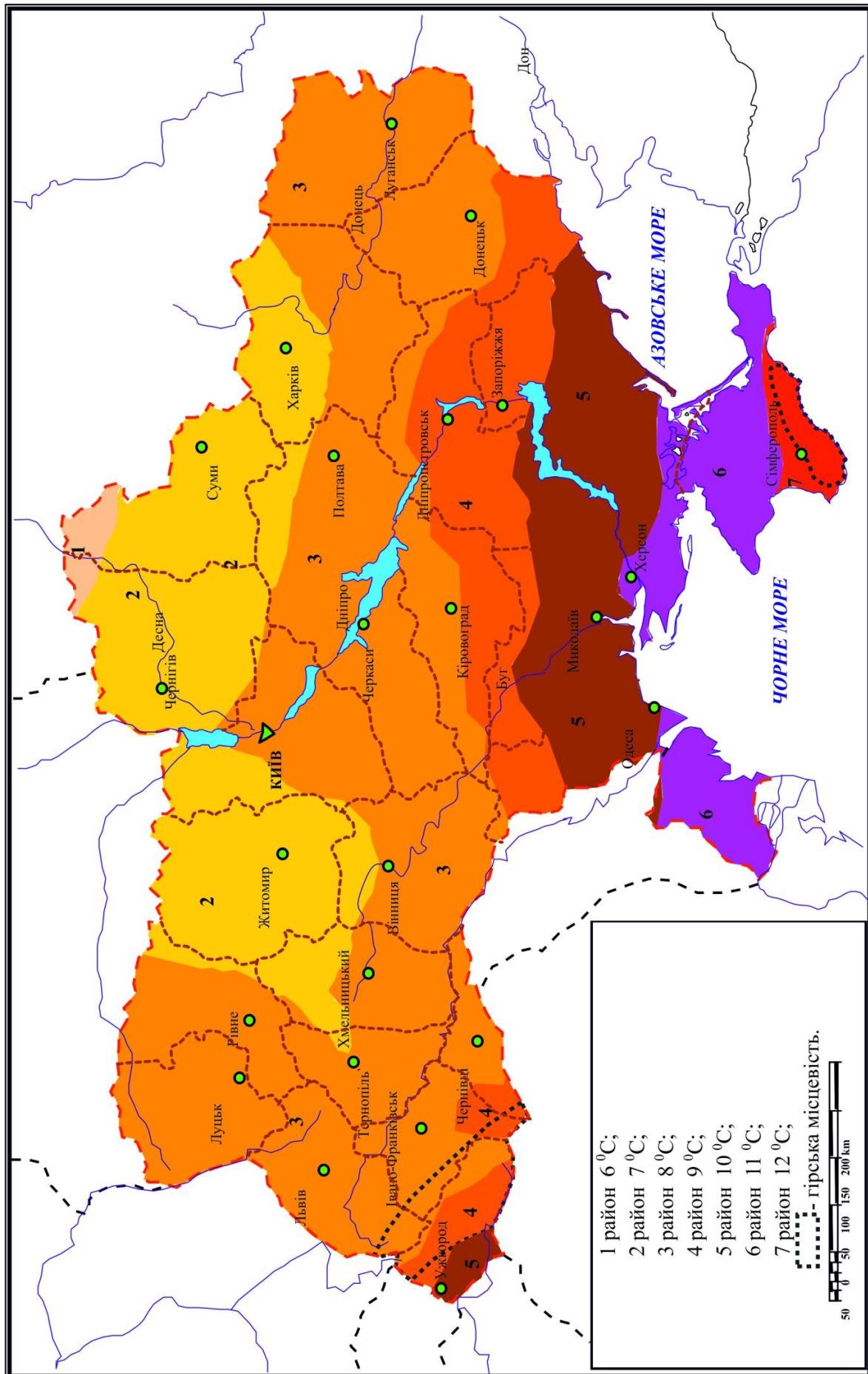


Рис. Б.3. Районування території України за середньорічною температурою повітря

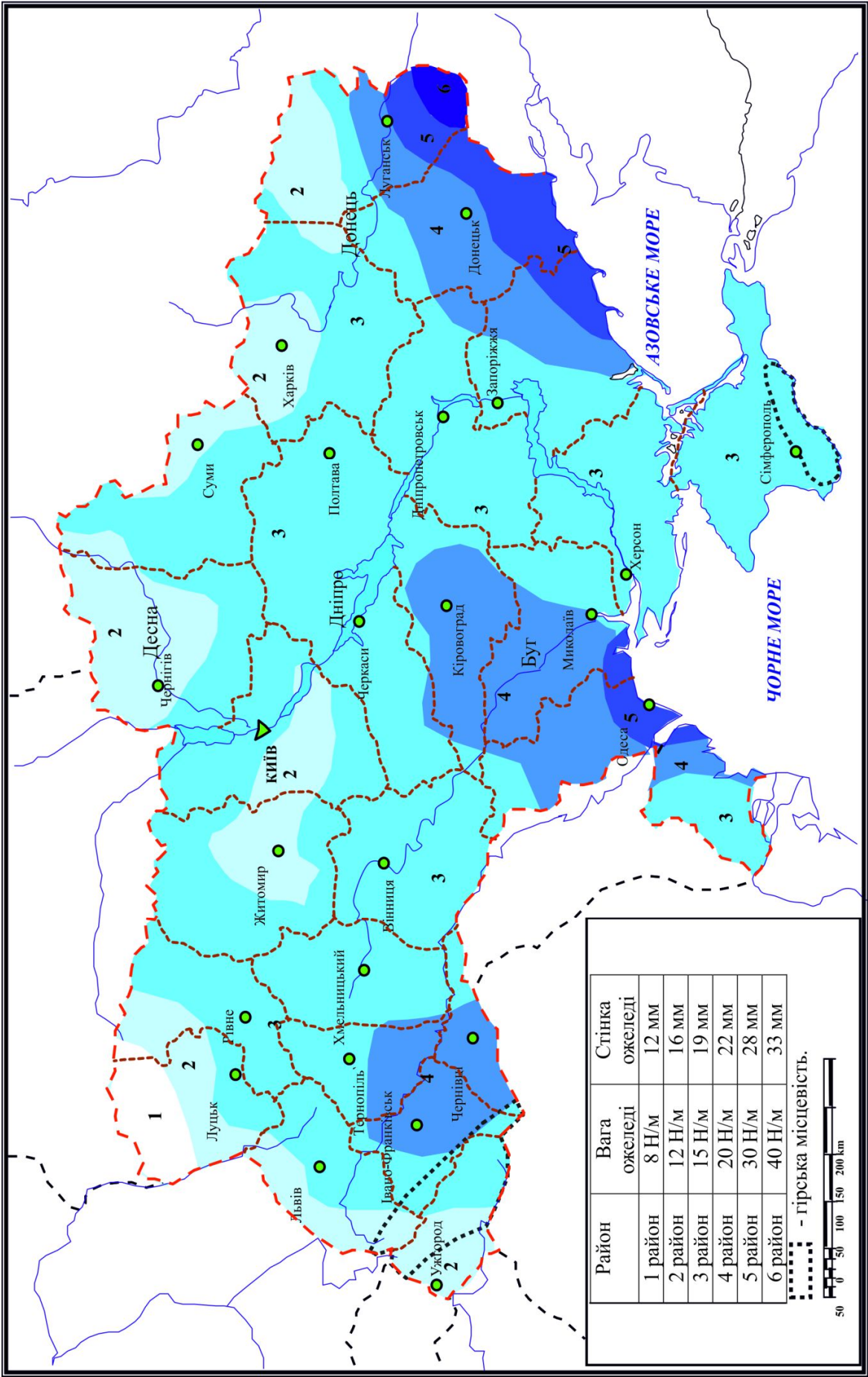


Рис. Б.4. Районування території України за характеристичними значеннями ожеледі

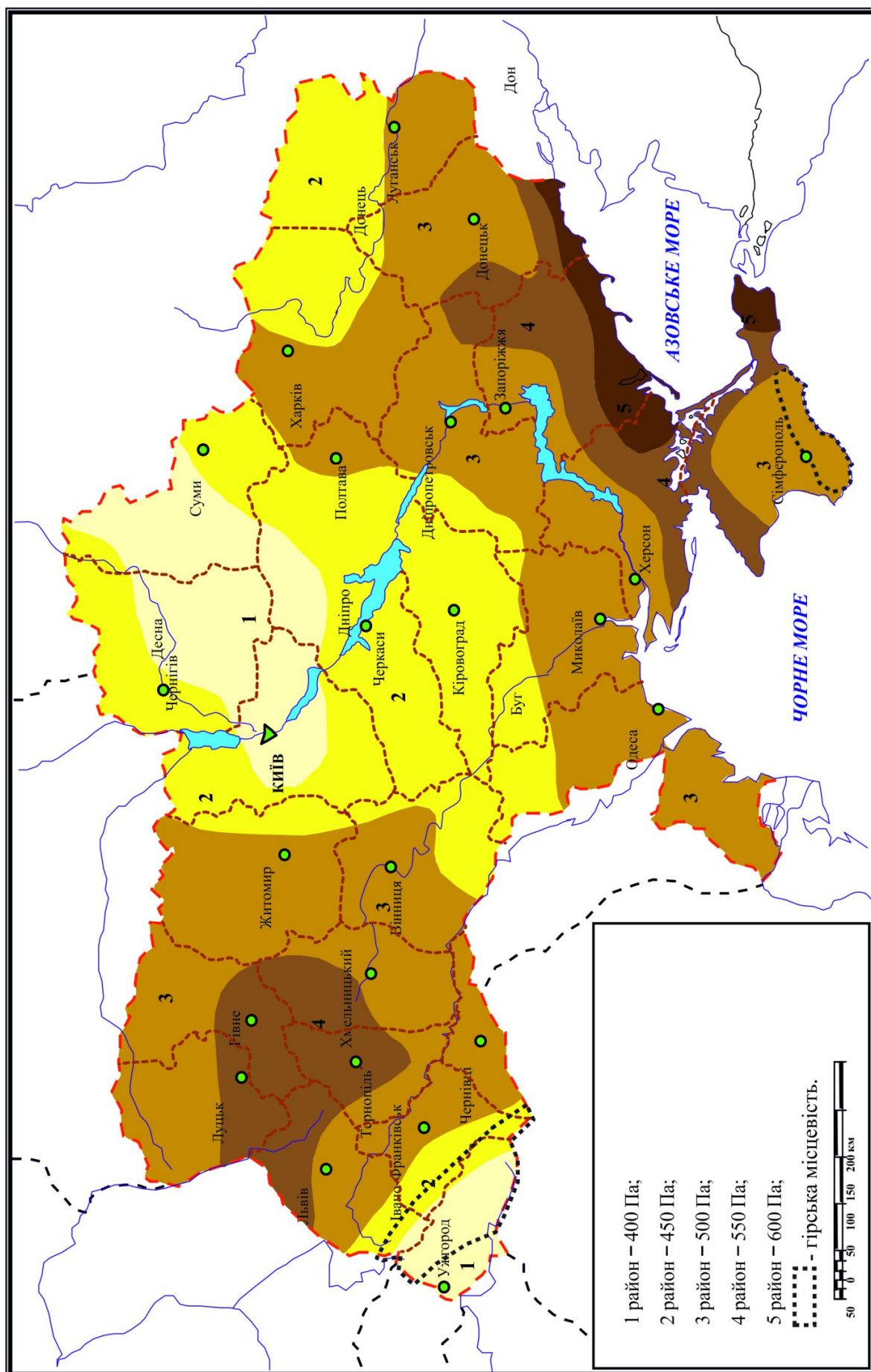


Рис. Б.5. Районування території України за характеристичними значеннями натиску вітру

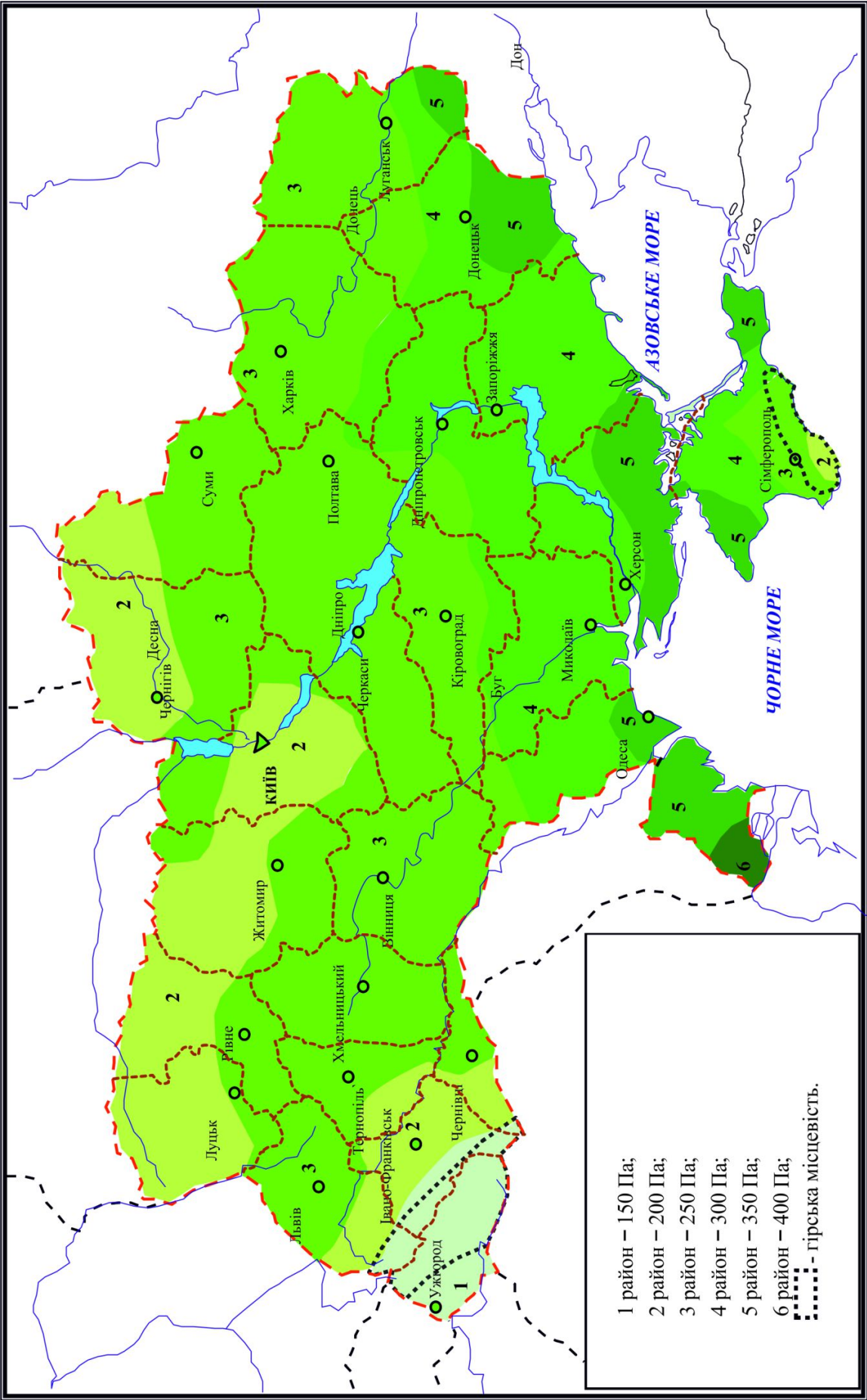


Рис. Б.6. Районування території України за характеристичними значеннями натиску вітру під час ожеледі

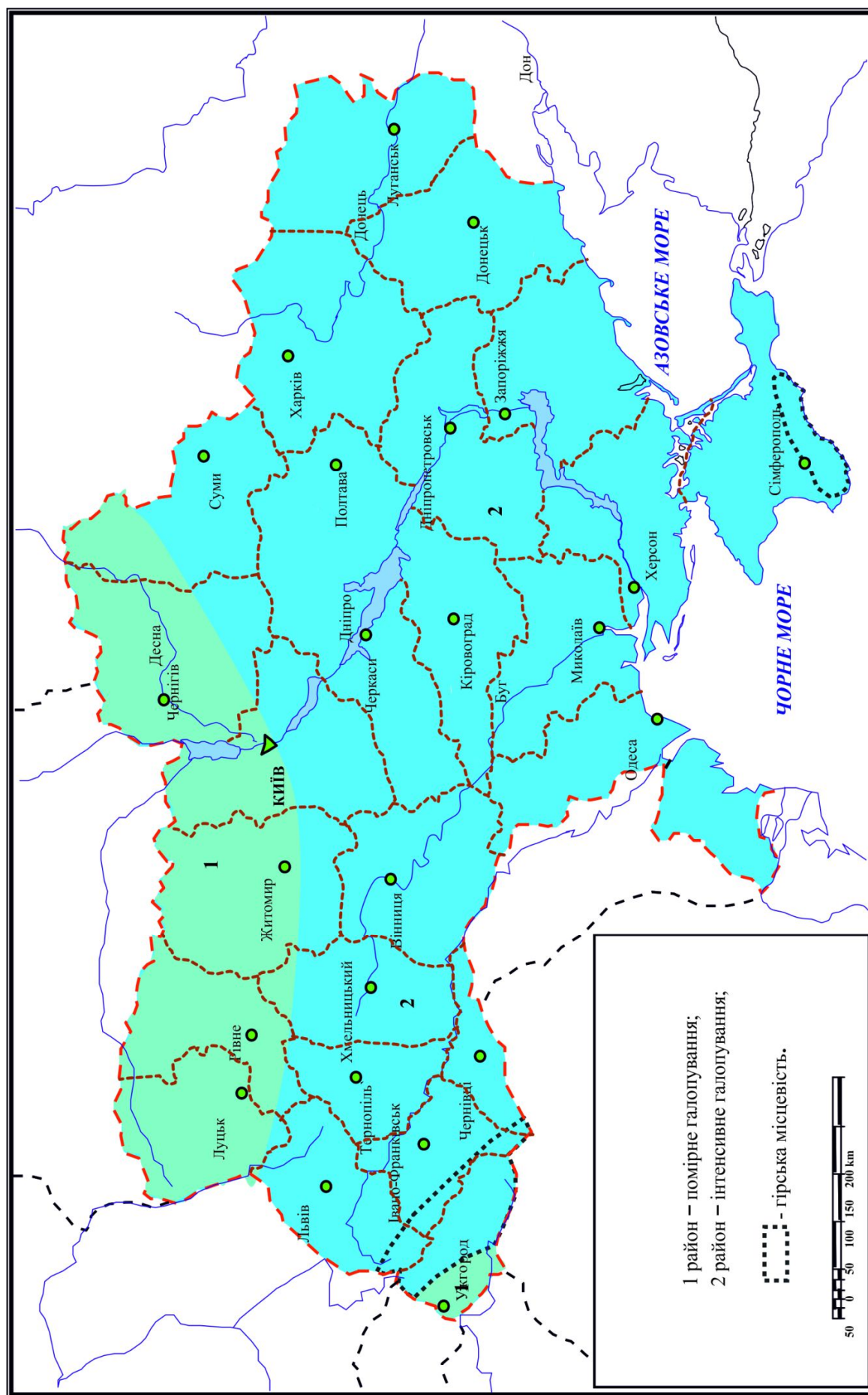


Рис. Б.7.7. Районування території України за частотою за інтенсивністю ґалопування проводів

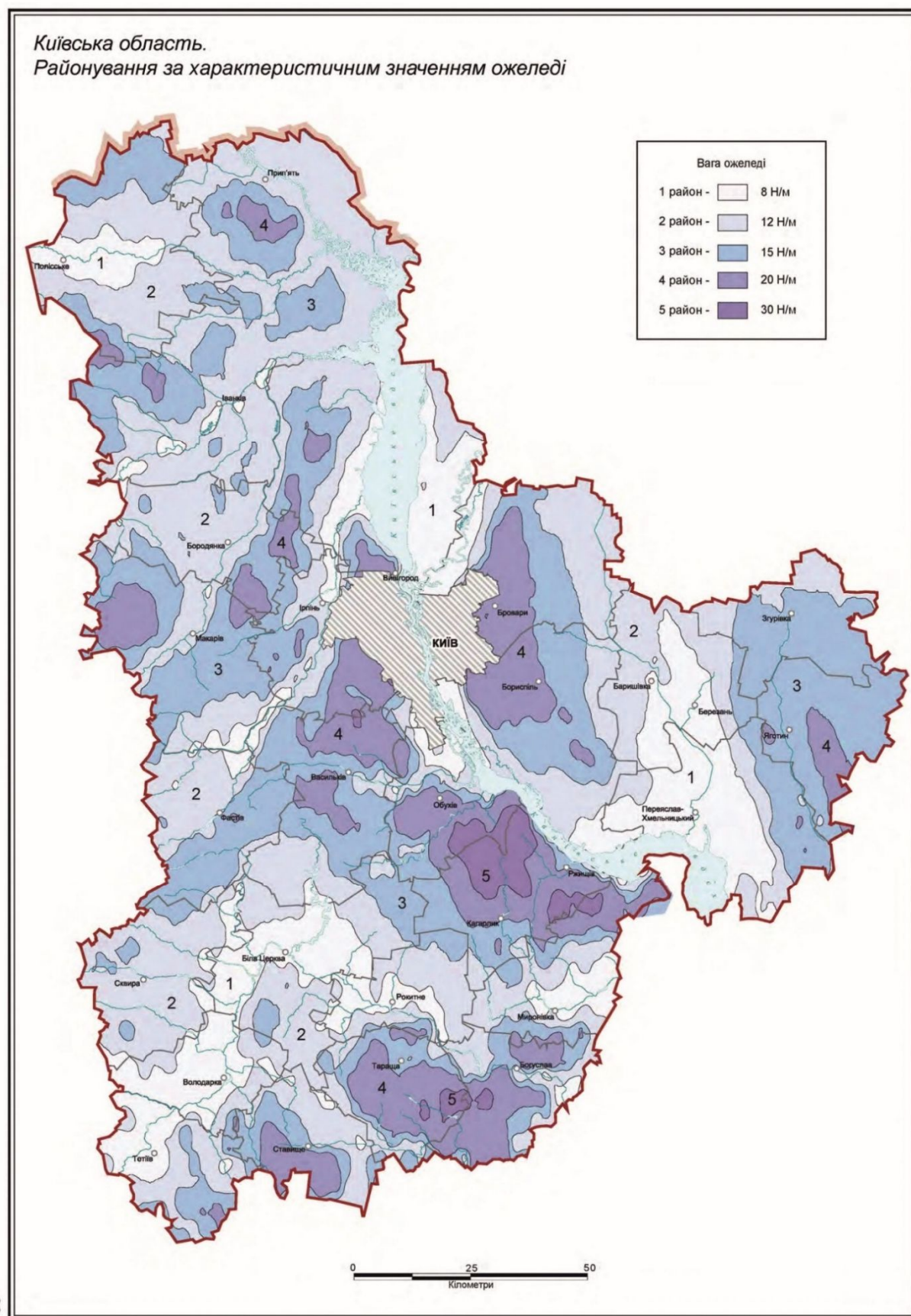


Рис. Б.8. Кліматичне районування території Київської області за навантаженням від ваги ожеледі

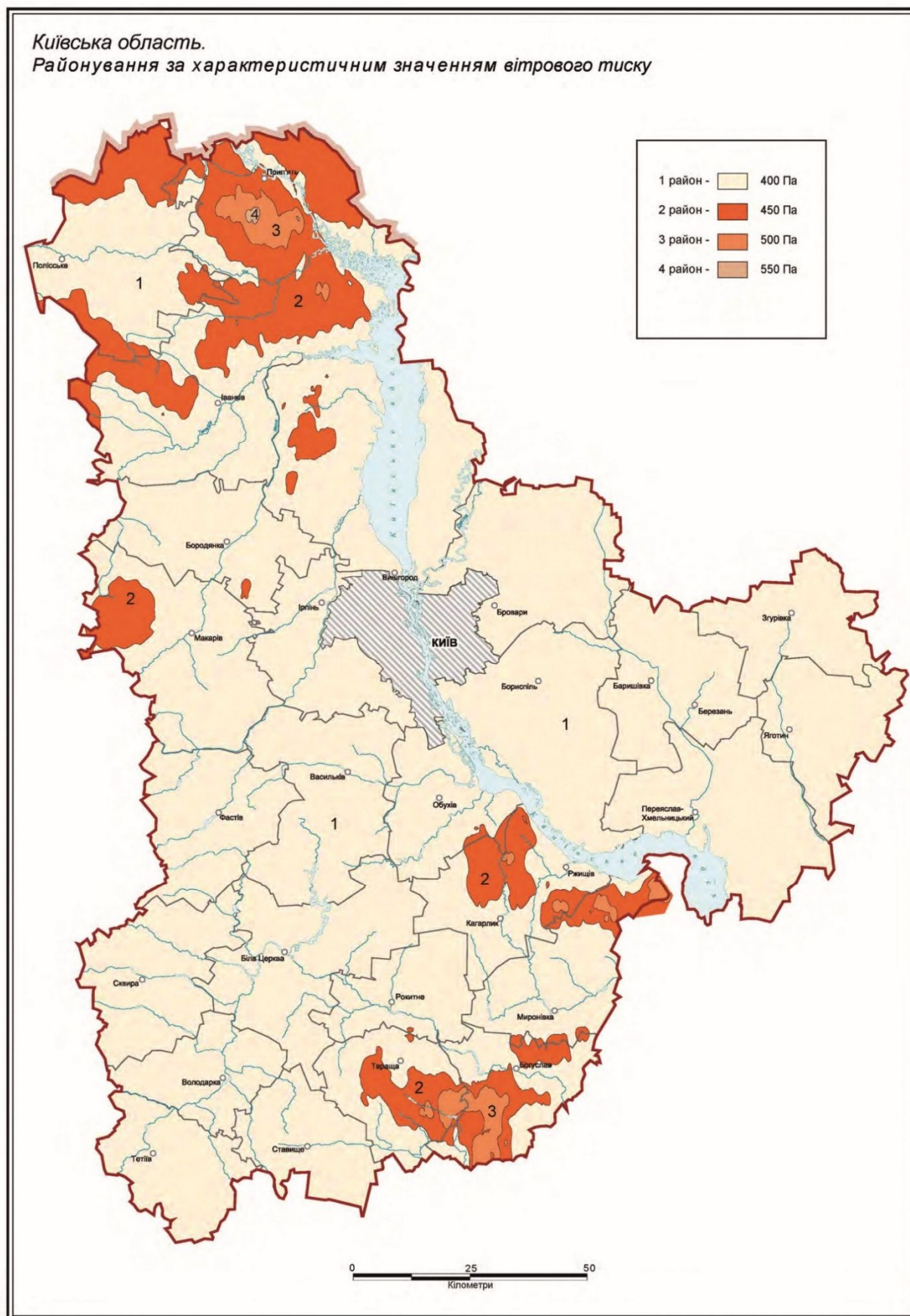


Рис. Б.9. Кліматичне районування території Київської області за навантаженням від натиску вітру

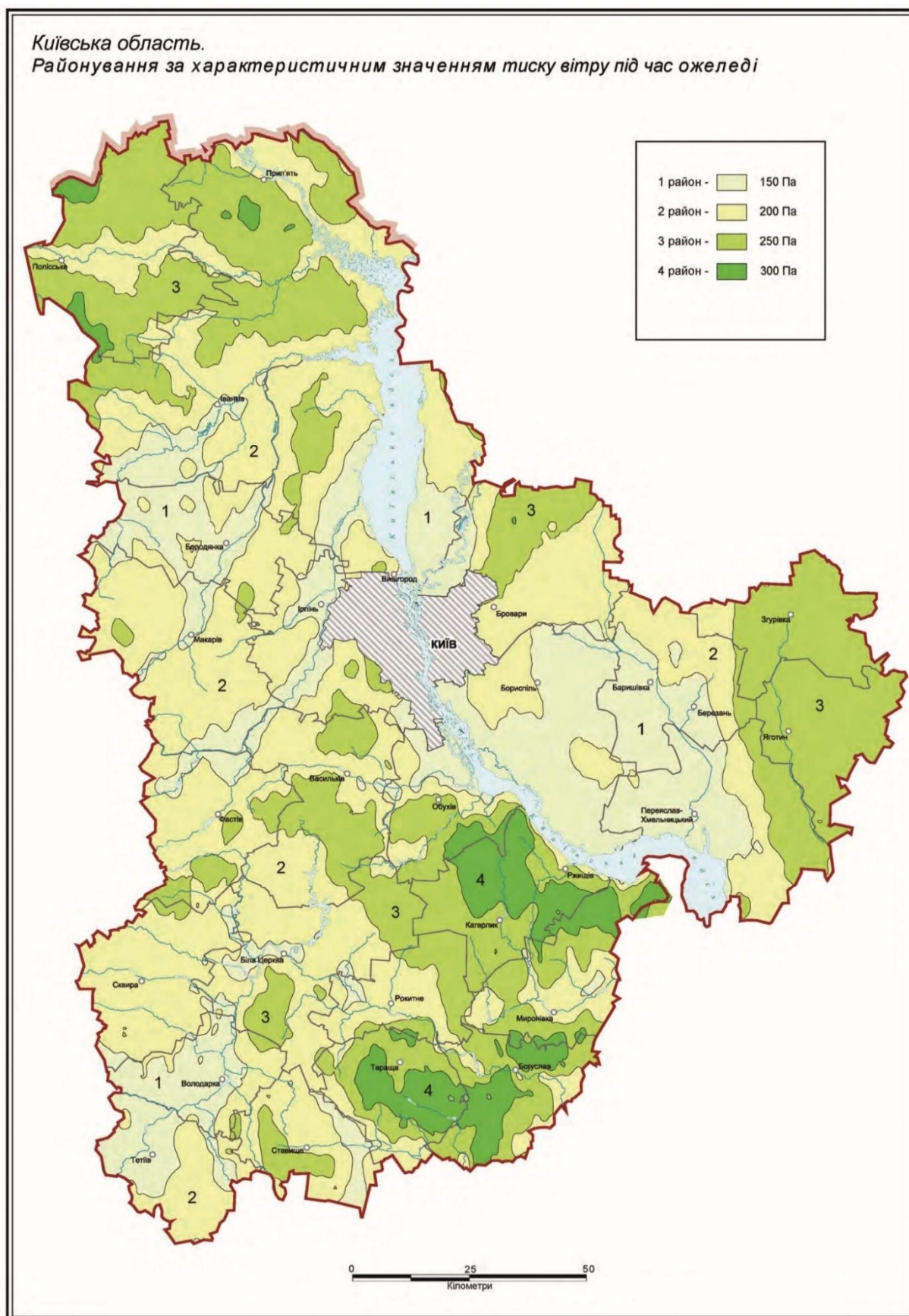


Рис. Б.10. Кліматичне районування території Київської області за навантаженням від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю

ДОДАТОК В. ТИПОВІ ЗАДАЧІ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Задача 1.

Повітряна лінія електропередавання виконана проводами марки АС-400/64.

Визначити еквівалентні модуль пружності та коефіцієнт теплового здовження сталеалюмінієвого проводу. Дослідити розподіл тяжіння між сталевими та алюмінієвими проволочками проводу. Визначити теплове напруження, що виникає під час нагрівання / охолодження проводу.

Сталеалюмінієвий провід АС-400/64 складається із сталевих осереддя, звитого з 7 сталевих оцинкованих проволокон діаметром 3,4 мм (один повив проволоч) та струмопровідної частини з 26 алюмінієвих проволокон діаметром 4,37 мм (два повиву), як показано на рис. В.1.

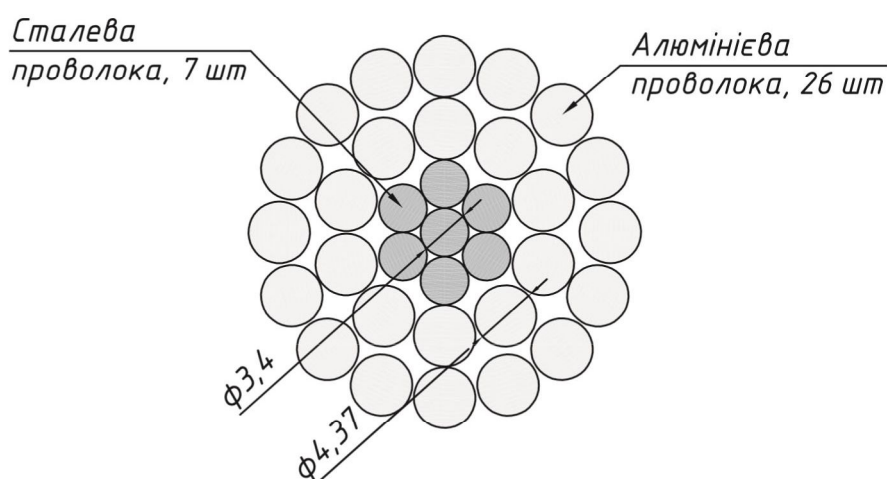


Рис. В.1. Поперечний переріз проводу АС 400/64

Технічні характеристики матеріалів проволокон осереддя та струмопровідної частини становлять

| | осереддя | струмопровідний шар |
|--------------------------------|---|---|
| кількість проволокон | $n_c := 7$ | $n_a := 26$ |
| діаметр проволокон | $d_c := 3.4 \text{ мм}$ | $d_a := 4.37 \text{ мм}$ |
| модуль пружності | $E_c := 200 \text{ ГПа}$ | $E_a := 63 \text{ ГПа}$ |
| коефіцієнт теплового здовження | $\alpha_c := 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ | $\alpha_a := 23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ |

Розрахункові перерізи складових сталевалюмінієвого проводу та сумарний переріз складають

$$F_c := n_c \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 63.55 \text{ мм}^2 \quad F_a := n_a \cdot \frac{\pi \cdot d_a^2}{4} = 389.97 \text{ мм}^2$$

$$F := F_c + F_a = 453.52 \text{ мм}^2$$

Співвідношення перерізів струмопровідної частини до сталевго осереддя дорівнює

$$k := \frac{F_a}{F_c} = 6.136$$

Отриманий результат свідчить про те, що даний провід призначений для роботи в умовах середніх механічних навантажень. При цьому переріз сталевго осереддя складає

$$\frac{F_c}{F} = 14.0\% \text{ сумарного перерізу проводу.}$$

Співвідношення між модулями пружності та коефіцієнтами теплового здовження перерізів струмопровідної частини до сталевго осереддя складають

$$m := \frac{E_a}{E_c} = 0.315 \quad n := \frac{\alpha_a}{\alpha_c} = 1.917$$

Відповідно до виразів (2.5) та (2.12) еквівалентні модуль пружності та коефіцієнт теплового здовження сталевалюмінієвого проводу складають

$$E := E_c \frac{1 + k \cdot m}{1 + k} = 82.2 \text{ ГПа}$$

$$\alpha := \alpha_c \frac{1 + k \cdot m \cdot n}{1 + k \cdot m} = 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

Зазначимо, що довідникові матеріали подають еквівалентний модуль пружності сталевалюмінієвого проводу з округленням до 500 МПа, тобто

$$E := 82.5 \text{ ГПа}$$

Визначимо розподіл навантаження між сталевим осереддям та струмопровідною алюмінієвою частиною проводу. За виразами (2.6) такий розподіл становить

$$T_c := \frac{1}{1 + k \cdot m} = 34.1\%$$

$$T_a := \frac{k \cdot m}{1 + k \cdot m} = 65.9\%$$

Отже, сталеве осереддя проводу сприймає більше 1/3 навантаження за перерізу, що складає менше 15% сумарного.

Водночас, через менший переріз осереддя, сталеві проволочки зазнають суттєво більшого напруження, ніж алюмінієві. Дійсно, виникнення тяжіння 1 κH обумовлює такі напруження сталевих та алюмінієвих проволочок:

$$\sigma_c := \frac{T_c \cdot 1 \text{ } \kappa H}{F_c} = 5.365 \text{ } МПа$$

$$\sigma_a := \frac{T_a \cdot 1 \text{ } \kappa H}{F_a} = 1.69 \text{ } МПа$$

співвідношення між якими становить

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_a} = 3.175$$

Тобто напруження проволочок сталевих осереддя більше, ніж в три рази перевищує напруження алюмінієвих проволочок.

Визначимо теплове напруження, що виникає в проволочках сталевих осереддя та струмопровідної частини проводу за зміни температури на 1 градус. Відповідно до виразів (2.11) такі напруження становлять

$$\sigma_c := (\alpha - \alpha_c) E_c = 1449.87 \frac{\kappa Па}{K}$$

$$N_c := \sigma_c \cdot F_c = 92.146 \frac{H}{K}$$

$$\sigma_a := (\alpha - \alpha_a) E_a = -236.29 \frac{\kappa Па}{K}$$

$$N_a := \sigma_a \cdot F_a = -92.146 \frac{H}{K}$$

Додатний знак теплового напруження сталевих проволочок означає, що із збільшенням температури сталеві проволочки зазнають додаткового розтягуючого зусилля. Від'ємний знак теплового напруження алюмінієвих проволочок означає, що із збільшенням температури алюмінієві проволочки зазнають додаткового стискаючого зусилля.

Через менший переріз сталевго осереддя теплове напруження сталевих проволонк істотно перевищує напруження алюмінієвих проволонк проводу. Очевидно, таке співвідношення відповідає оберненому відношенню між перерізами струмопровідної частини до сталевго осереддя проводу

$$\left| \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \right| = 6.136$$

Задача 2.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 зазнає питомого навантаження 100 кПа/м , напруження проводу складає 120 МПа .

Визначити стріли провисання проводу у прогонах довжиною 900 та 450 м.

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу становлять

| | |
|-------------------------------|---|
| питоме навантаження на провід | $\gamma := 100 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| напруження проводу | $\sigma := 120 \text{ МПа}$ |
| довжини прогонів | $l_1 := 900 \text{ м} \quad l_2 := 450 \text{ м}$ |

Розглянемо спочатку більший прогін, довжиною 900 м. Оскільки довжина прогону перевищує 800 м, стрілу провисання слід визначати за двоскладовим виразом (2.38)

$$f_1 := \frac{\gamma \cdot l_1^2}{8 \sigma} + \frac{\gamma^3 l_1^4}{384 \sigma^3} = 85.364 \text{ м}$$

Співвідношення між другою та першою складовими стріли провисання проводу за виразом (2.38) становить

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\gamma \cdot l_1}{4 \sigma} \right)^2 = 1.2\%$$

Отриманий результат свідчить про істотність похибки у визначенні стріли провисання у разі нехтування другим доданком двоскладового виразу для прогону довжиною 900 м.

Для другого прогону довжиною 450 *м* похибка у разі нехтування другим доданком зневажливо мала і становить

$$\frac{1}{3} \left(\frac{\gamma \cdot l_2}{4 \sigma} \right)^2 = 0.3\%$$

Це визначає допустимість визначення стріли провисання проводу за односкладовим виразом (2.31)

$$f_2 := \frac{\gamma \cdot l_2^2}{8 \sigma} = 21.094 \text{ м}$$

Задача 3.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 зазнає питомого навантаження 100 *кПа/м*, напруження проводу в нижній точці провисання становить 120 *МПа*, стріла провисання у прогоні дорівнює 21 *м*.

Визначити тяжіння в точках закріплення проводу на опорах.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу становлять

| | |
|-------------------------------|---|
| переріз проводу | $F := 453.52 \text{ мм}^2$ |
| питоме навантаження на провід | $\gamma := 100 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| напруження проводу | $\sigma_0 := 120 \text{ МПа}$ |
| стріла провисання | $f := 21 \text{ м}$ |

Напруження проводу в точках закріплення на опорах за виразом (2.47) дорівнює

$$\sigma := \sigma_0 + \gamma \cdot f = 122.1 \text{ МПа}$$

Відповідне тяжіння становить

$$T := \sigma \cdot F = 55.4 \text{ кН}$$

Збільшення тяжіння в точках закріплення проводу понад значення в нижній точці провисання складає

$$\frac{\gamma \cdot f}{\sigma_0} = 1.75\%$$

Отриманий результат свідчить про допустимість проведення механічних розрахунків за тяжінням (напруженням) в нижній точці провисання проводу з урахуванням допустимого 5%-го перевищення допустимого тяжіння в точках закріплення проводу на опорах.

Задача 4.

Провід повітряної лінії марки АС-400/64 закріплено у прогоні довжиною 400 м. Стріла провисання проводу дорівнює 21 м.

Визначити довжину проводу у прогоні.

Відповідно до умов задачі технічні характеристики проводу у прогоні становлять

довжина прогону $l := 400 \text{ м}$

стріла провисання $f := 21 \text{ м}$

Довжина проводу в прогоні за двокомпонентним виразом (2.56) становить

$$L := l + \frac{8}{3} \frac{f^2}{l} = 402.94 \text{ м}$$

Для прогону довжиною 400 м нехтування третім компонентом виразу (2.57) для визначення довжини проводу допустимо, оскільки похибка зневажливо мала та складає всього

$$\frac{32}{15} \frac{f^4}{l^3 L} = 0.0016\%$$

Довжина проводу в прогоні перевищує довжину прогону на

$$L - l = 2.94 \text{ м} \qquad \frac{L - l}{l} = 0.73\%$$

Отриманий результат свідчить про допустимість припущення про рівномірний розподіл навантаження вздовж прогону під час формування спрощеної моделі кривої провисання проводу у формі параболи.

Задача 5.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана сталевалюмінієвими проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням стрижневих полімерних ізоляторів ЛК 70/110-IV.

Визначити середню висоту розташування центру мас проводів лінії для габаритного прогону.

Конструктивні розміри проміжної опори ПМ-110-3ф та лінійного ізолятора ЛК 70/110-IV зазначено на рис. В.2 та В.3 відповідно.

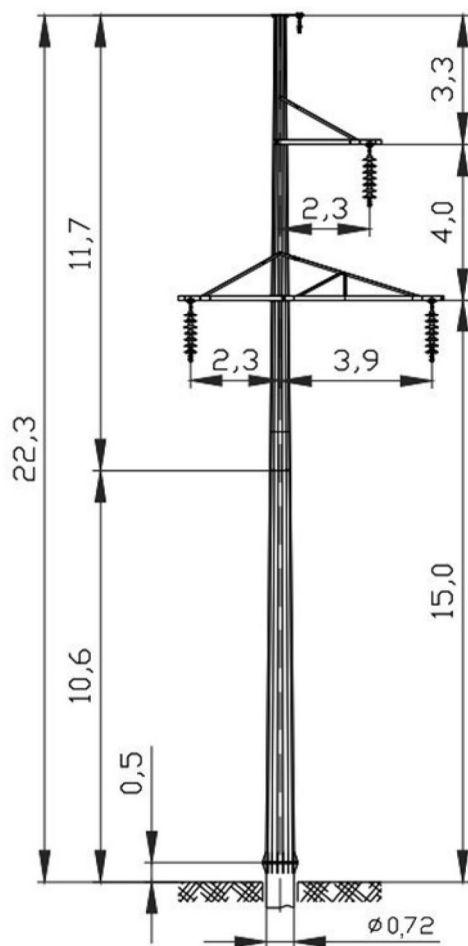


Рис. В.2. Проміжна опора ПМ-110-3ф

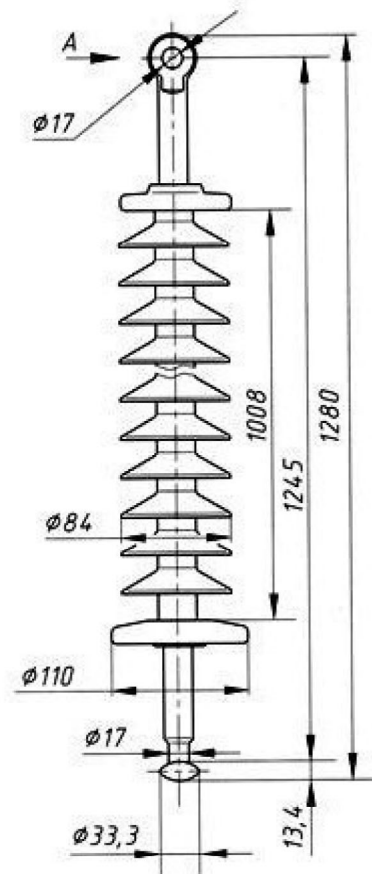


Рис. В.3. Ізоляційний підвіс ЛК 70/110-IV

Конструктивні розміри опори ПМ-110-3ф

висота нижніх траверс $h_1 := 15 \text{ м}$

висота верхньої траверси $h_3 := h_1 + 4 \text{ м} = 19 \text{ м}$

Будівельна висота ізоляційного підвісу ЛК 70/110-IV

$$\lambda := 1280 \text{ мм}$$

Відповідно до схеми опори на рис. В.2 висота закріплення нижнього проводу на опорі дорівнює

$$h_0 := h_1 - \lambda = 13.72 \text{ м}$$

Середня висота закріплення проводів на опорі становить

$$h_{\text{сер}} := \frac{2 h_1 + h_3}{3} - \lambda = 15.053 \text{ м}$$

Нормована габаритна відстань між проводом та землею лінії напругою 110 кВ для ненаселеної місцевості за даними табл. А.15 дорівнює

$$\Gamma := 6 \text{ м}$$

Таким чином, габаритна стріла провисання проводу за виразом (2.63) становить

$$f_z := h_0 - \Gamma = 7.72 \text{ м}$$

Отже, відповідно до виразу (2.62), висота розташування зведеного центру мас всіх фазних проводів у прогоні дорівнює

$$h_c := h_{\text{сер}} - \frac{2}{3} f_z = 9.907 \text{ м}$$

Задача 6.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Висота розташування зведеного центру мас всіх фазних проводів у прогоні дорівнює 9.907 м. Траса повітряної лінії проходить по ненаселеній сільській місцевості II типу, яку віднесено до 3 району за ожеледдю, 1 району за вітровим навантаженням, 2 району за вітровим натиском під час ожеледі.

Розрахувати одиничні та питомі навантаження на проводи повітряної лінії у прогоні довжиною 250 м та визначити режим максимальних навантажень.

Відповідно до умов задачі технічні характеристики проводу АС-240/39 становлять

розрахунковий переріз $F := 274.67 \text{ мм}^2$

зовнішній діаметр $d := 21.6 \text{ мм}$

погонна маса $m_0 := 952 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$

Умови в районі траси лінії характеризуються наступними характеристичними значеннями кліматичних навантажень:

товщина стінки ожеледі $b := 19 \text{ мм}$

швидкісний натиск вітру $q := 400 \text{ Па}$

натиск вітру під час ожеледі $q' := 200 \text{ Па}$

Довжина прогону

$$l := 250 \text{ м}$$

Висота розташування зведеного центру мас всіх проводів

$$h_c = 9.907 \text{ м}$$

Лінії електропередавання напругою 110 кВ віднесено до класу безвідмовності ЗКБ, що визначає середній період повторюваності експлуатаційних навантажень 15 років (див. дані табл. 3.1).

1. Навантаження від власної ваги проводу

Відповідно до виразів (3.1) та (3.2) одиничні та питомі навантаження від власної ваги проводу становлять:

$$p_1 := g \cdot m_0 = 9.336 \frac{H}{м} \quad \gamma_1 := \frac{p_1}{F} = 33.99 \frac{кПа}{м}$$

2. Навантаження від ваги відкладень ожеледі

$$\text{Густина льоду} \quad \rho := 0.9 \frac{г}{см^3}$$

За даними табл. 3.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вагою ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fm} := 0.7$$

Поправковий коефіцієнт за висотою розташування проводу визначимо за методом лінійної інтерполяції даних, наведених в табл. 3.5:

| h (м) | k |
|------------|-----|
| 5 | 0.8 |
| 10 | 1.0 |

$$k := k_0 + \frac{(h_c - h_0)(k_1 - k_0)}{h_1 - h_0} = 0.996$$

В аналогічний спосіб визначимо поправковий коефіцієнт щодо діаметру проводу

| $diam$ (мм) | μ |
|----------------|-------|
| 20 | 0.9 |
| 30 | 0.8 |

$$\mu := \mu_0 + \frac{(d - diam_0)(\mu_1 - \mu_0)}{diam_1 - diam_0} = 0.884$$

Таким чином, відповідно до виразу (3.5) одиничне навантаження від ваги ожеледі становить

$$p_2 := \rho \cdot g \cdot \gamma_{fm} \cdot \pi \cdot k \cdot \mu \cdot b \cdot (d + k \cdot \mu \cdot b) = 12.45 \frac{H}{м}$$

3. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю

Відповідно до виразів (3.6) одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_3 := p_1 + p_2 = 21.786 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \qquad \gamma_3 := \frac{p_3}{F} = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$$

4. Навантаження від натиску вітру

За даними табл. 3.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням дорівнює

$$\gamma_{fmax} := 0.8$$

Оскільки діаметр проводу перевищує 20 мм, аеродинамічний коефіцієнт становить

$$C_x := 1.1$$

Визначимо складові коефіцієнту динамічності натиску вітру. За даними табл. 3.10 коефіцієнт впливу пульсаційного складника для сільської місцевості (тип II) дорівнює

$$q_{tu} := 1.5$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону

$$\alpha_- := 2.6 - 0.3 \ln(q \cdot \text{Па}^{-1}) = 0.803$$

Коефіцієнт довжини прогону

$$K_l := 1.7 - 0.12 \ln(l \cdot \text{м}^{-1}) = 1.037$$

Отже, відповідно до виразу (3.10), коефіцієнт динамічності натиску вітру дорівнює

$$C_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha_- \cdot K_l = 1.249$$

Коефіцієнт висоти розташування проводу визначаємо з урахуванням параметрів табл. 3.12:

$$C_h := 1 \left(0.1 \cdot h_c \cdot \text{м}^{-1} \right)^{2 \cdot 0.15} = 0.997$$

Решта складових коефіцієнту впливу розташування проводів (коефіцієнти рельєфу та напрямку вітру) дорівнюють одиниці:

$$C_R := 1$$

$$C_{DIR} := 1$$

Відповідно до виразу (3.11) коефіцієнт впливу розташування проводів становить

$$C_c := C_h \cdot C_R \cdot C_{DIR} = 0.997$$

Таким чином, за виразом (3.9) одиничне навантаження від натиску вітру дорівнює

$$p_4 := \gamma_{fmax} \cdot C_x \cdot C_{dc} \cdot C_c \cdot q \cdot d = 9.469 \frac{H}{m}$$

5. Навантаження від натиску вітру на проводи, вкриті ожеледдю

За даними табл. 3.2 для ліній класу безперебійності ЗКБ коефіцієнт надійності за вітровим навантаженням під час ожеледі дорівнює

$$\gamma_{fQ} := 0.71$$

Оскільки в даному режимі проводи вкриті ожеледдю, аеродинамічний коефіцієнт дорівнює

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнт нерівномірності натиску вітру вздовж прогону для режиму вітру під час ожеледі становить

$$\alpha'_- := 2.6 - 0.3 \cdot \ln(q' \cdot Pa^{-1}) = 1.011$$

Оскільки даний коефіцієнт не має перевищувати одиниці, фіксуємо його на порушеній межі, тобто

$$\alpha'_- := 1$$

Решта складових коефіцієнту динамічності натиску вітру такі самі, що й в режимі максимального вітру. Отже

$$C'_{dc} := q_{tu} \cdot \alpha'_- \cdot K_I = 1.556$$

Коефіцієнт впливу розташування проводів залишається таким самим, що й в режимі максимального вітру.

Таким чином, відповідно до одиничне навантаження від натиску вітру під час ожеледі становить

$$p_5 := \gamma_{fQ} \cdot C_x \cdot C'_{dc} \cdot C_c \cdot q' \cdot d = 5.711 \frac{H}{m}$$

6. Сумарне навантаження від ваги проводу та натиску вітру.

Відповідно до виразу (3.13) одиничне та питоме навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_6 := \sqrt{p_1^2 + p_5^2} = 10.944 \frac{H}{m} \quad \gamma_6 := \frac{p_6}{F} = 39.846 \frac{кПа}{м}$$

7. Сумарне навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру.

З виразом (3.14) одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру становлять:

$$p_7 := \sqrt{(p_1 + 0.9 \cdot p_2)^2 + p_6^2} = 23.275 \frac{H}{m} \quad \gamma_7 := \frac{p_7}{F} = 84.737 \frac{кПа}{м}$$

Зіставлення сумарних навантажень від ваги проводу вкритого ожеледдю, ваги проводу та натиску вітру, а також ваги проводу, вкритого ожеледдю та натиску вітру визначає що режимом максимальних навантажень є режим вітру під час ожеледі. Дійсно

$$p_7 > p_3 > p_6 \quad 23.275 \frac{H}{m} > 21.786 \frac{H}{m} > 10.944 \frac{H}{m}$$

$$\gamma_7 > \gamma_3 > \gamma_6 \quad 84.737 \frac{кПа}{м} > 79.317 \frac{кПа}{м} > 39.846 \frac{кПа}{м}$$

Отже

$$\gamma_{max} := \gamma_7 = 84.737 \frac{кПа}{м}$$

Задача 7.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою $-36^\circ C$. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Дослідити зміну довжини проводу у прогоні 250 м в режимі найбільших навантажень.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 у прогоні становлять

| | |
|--------------------------------|---|
| довжина прогону | $l := 250 \text{ м}$ |
| модуль пружності | $E := 82.5 \text{ ГПа}$ |
| коефіцієнт теплового здовження | $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ |

Питомі навантаження, які зазнає провід

| | |
|-----------------------------------|--|
| від власної ваги | $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| в режимі максимальних навантажень | $\gamma_{\max} = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |

Температурні режими проводу становлять

| | |
|-----------------------------------|--|
| мінімальна температура | $t_{\min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| в режимі максимальних навантажень | $t_o := -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

Відповідно до умов задачі для розрахунку за рівнянням стану проводу у прогоні за вихідний слід прийняти режим мінімальних температур, тобто

| | |
|---------------------|--|
| напруження проводу | $\sigma_o := 117.5 \text{ МПа}$ |
| питоме навантаження | $\gamma_o := \gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| температура проводу | $t_o := t_{\min} = -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

Довжина проводу у прогоні у вихідному режимі за виразом (2.55) становить

$$L_o := l + \frac{\gamma_o^2 l^3}{24 \sigma_o^2} = 250.054 \text{ м}$$

Визначимо напруження проводу в режимі максимальних навантажень за виразом (3.21):

$$A := \frac{1}{24} \cdot \gamma_{\max}^2 \cdot E \cdot l^2 = (1.543 \cdot 10^6) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 \cdot E \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_o - t_0) = 50.418 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 115.782 \text{ МПа}$$

$$\sigma := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9C} = 135.028 \text{ МПа}$$

Довжина проводу у прогоні в режимі максимальних навантажень дорівнює

$$L := l + \frac{\gamma_{max}^2 \cdot l^3}{24 \sigma^2} = 250.256 \text{ м}$$

Здовження проводу складає

$$\Delta L := L - L_0 = 0.202 \text{ м}$$

що становить

$$\frac{\Delta L}{L_0} = 0.08\% \quad \text{довжини проводу у вихідному режимі}$$

Задача 8.

Анкерована ділянка повітряної лінії складається з п'яти прогонів, довжини яких складають 260, 240, 245, 255 та 250 м. Відмітки закріплення проводу на опорах становлять 140, 125, 135, 135, 141 та 152 м відповідно.

Визначити довжину зведеного прогону.

Відповідно до умов задачі характеристики закріплення проводу в прогонах анкерованої ділянки становлять

довжини прогонів

$$l_1 := 260 \text{ м} \quad l_2 := 240 \text{ м} \quad l_3 := 245 \text{ м} \quad l_4 := 255 \text{ м} \quad l_5 := 250 \text{ м}$$

відмітки закріплення проводу

$$h_1 := 140 \text{ м} \quad h_2 := 125 \text{ м} \quad h_3 := 135 \text{ м} \quad h_4 := 135 \text{ м} \quad h_5 := 141 \text{ м} \quad h_6 := 152 \text{ м}$$

Визначимо довжину зведеного прогону з урахуванням перепадів висот точок закріплення проводу на опорах.

Для першого прогону кут нахилу прямої, що з'єднує точки закріплення проводу до горизонталі становить

$$\theta_1 := \operatorname{atan}\left(\frac{h_2 - h_1}{l_1}\right) = -3.3^\circ$$

В аналогічний спосіб визначаємо кути нахилу прямих, які з'єднують точки закріплення проводу для решти прогонів анкерованої ділянки

$$\begin{aligned}\theta_2 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{h_3 - h_2}{l_2}\right) = 2.4^\circ & \theta_3 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{h_4 - h_3}{l_3}\right) = 0^\circ \\ \theta_4 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{h_5 - h_4}{l_4}\right) = 1.3^\circ & \theta_5 &:= \operatorname{atan}\left(\frac{h_6 - h_5}{l_5}\right) = 2.5^\circ\end{aligned}$$

Відповідно до виразу (3.30) косинус зведеного кута нахилу для анкерованої ділянки в цілому становить

$$\cos\theta_{\text{зв}} := \frac{\frac{l_1}{(\cos(\theta_1))^2} + \frac{l_2}{(\cos(\theta_2))^2} + \frac{l_3}{(\cos(\theta_3))^2} + \frac{l_4}{(\cos(\theta_4))^2} + \frac{l_5}{(\cos(\theta_5))^2}}{\frac{l_1}{(\cos(\theta_1))^3} + \frac{l_2}{(\cos(\theta_2))^3} + \frac{l_3}{(\cos(\theta_3))^3} + \frac{l_4}{(\cos(\theta_4))^3} + \frac{l_5}{(\cos(\theta_5))^3}} = 0.999$$

Таким чином, довжина зведеного прогону дорівнює

$$l_{\text{зв}} := \frac{1}{\cos\theta_{\text{зв}}} \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3}{\frac{l_1}{(\cos(\theta_1))^2} + \frac{l_2}{(\cos(\theta_2))^2} + \frac{l_3}{(\cos(\theta_3))^2} + \frac{l_4}{(\cos(\theta_4))^2} + \frac{l_5}{(\cos(\theta_5))^2}}} = 250.3 \text{ м}$$

Визначимо довжину зведеного прогону у разі нехтування перепадом висот точок закріплення проводу на опорах. За виразом (3.29) такий параметр становить

$$l'_{\text{зв}} := \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + l_3^3 + l_4^3 + l_5^3}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}} = 250.3 \text{ м}$$

Очевидно, що похибка моделювання зневажливо мала і становить

$$\frac{l'_{зв} - l_{зв}}{l_{зв}} = -0.00005\%$$

Отриманий результат свідчить про те, що для рівнинної місцевості допустимо нехтувати перепадом висот точок закріплення проводу на опорах та визначати довжину зведеного прогону за виразом (3.29).

Задача 9.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою -36°C та середньорічною температурою $+8^{\circ}\text{C}$. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Визначити вихідний кліматичний режим відповідно до методу допустимих напружень для прогону довжиною 250 м.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

| | |
|--------------------------------|---|
| довжина прогону | $l := 250 \text{ м}$ |
| модуль пружності | $E := 82.5 \text{ ГПа}$ |
| коефіцієнт теплового здовження | $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ |

Допустимі напруження

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| в режимі максимальних навантажень | $\sigma_{max} := 135 \text{ МПа}$ |
| в експлуатаційному режимі | $\sigma_e := 90 \text{ МПа}$ |

Питомі навантаження, які зазнає провід

| | |
|-----------------------------------|---|
| від власної ваги | $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| в режимі максимальних навантажень | $\gamma_{max} = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |

Температурні режими проводу

| | |
|------------------------|---|
| мінімальна температура | $t_{min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
|------------------------|---|

в режимі максимальних навантажень $t_o := -5 \text{ } ^\circ\text{C}$

середньорічна температура $t_e := 8 \text{ } ^\circ\text{C}$

За виразами (3.36) – (3.38) визначимо критичні прогони:

1. Перший критичний прогін

$$l_{1к} := \frac{\sigma_e}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_e - \sigma_{max} + \alpha \cdot E \cdot (t_e - t_{min})}{\frac{E}{24} \left(1 - \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{max}} \right)^2 \right)}} = 301.109 \text{ м}$$

2. Другий критичний прогін

$$l_{2к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{24 \alpha \cdot (t_o - t_{min})}{\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - 1}} = 207.87 \text{ м}$$

3. Третій критичний прогін

$$l_{3к} := \frac{\sigma_{max}}{\gamma_1} \sqrt{\frac{\sigma_{max} - \sigma_e + \alpha \cdot E \cdot (t_o - t_e)}{\frac{E}{24} \left(\left(\frac{\gamma_{max}}{\gamma_1} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \right)}} = 168.075 \text{ м}$$

Отже, співвідношення між критичними прогонами становить

$$l_{1к} > l_{2к} > l_{3к} \quad 301.109 \text{ м} > 207.87 \text{ м} > 168.075 \text{ м}$$

Це означає, що розрахунковим є другий критичний прогін, з яким слід порівнювати фактичний (зведений) прогін

$$l > l_{2к} \quad 250 \text{ м} > 207.87 \text{ м}$$

Таке співвідношення визначає, що, відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень, тобто режим вітру під час ожеледі (див. задачу 6)

Задача 10.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39. Кліматичні умови в районі траси лінії характеризуються мінімальною температурою -36°C , максимальною температурою $+36^{\circ}\text{C}$, середньорічною температурою $+8^{\circ}\text{C}$. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задачі 6.

Визначити стан проводу у розрахункових кліматичних режимах повітряної лінії в прогоні довжиною 250 м.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

| | |
|--------------------------------|---|
| довжина прогону | $l := 250 \text{ м}$ |
| модуль пружності | $E := 82.5 \text{ ГПа}$ |
| коефіцієнт теплового здовження | $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ |

Допустимі напруження проводу

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| в режимі максимальних навантажень | $\sigma_{max} := 135 \text{ МПа}$ |
| в експлуатаційному режимі | $\sigma_e := 90 \text{ МПа}$ |

Питомі навантаження, які зазнає провід

| | |
|-------------------------------------|---|
| від власної ваги | $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| від ваги проводу, вкритого ожеледдю | $\gamma_3 = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| від ваги проводу та натиску вітру | $\gamma_6 = 39.846 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| в режимі максимальних навантажень | $\gamma_7 = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |

Температурні режими проводу

| | |
|-----------------------------|---|
| максимальна температура | $t_{max} := 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| мінімальна температура | $t_{min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| температура під час ожеледі | $t_o := -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| середньорічна температура | $t_e := 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

Відповідно до методу допустимих напружень, вихідним є режим максимальних навантажень (режим вітру під час ожеледі) (див. задачу 9). Тобто

| | |
|---------------------|---|
| питоме навантаження | $\gamma_0 := \gamma_7 = 84.737 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| напруження проводу | $\sigma_0 := \sigma_{\max} = 135 \text{ МПа}$ |
| температура проводу | $t_0 := t_o = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ |

Розрахунки стану проводу будемо виконувати для таких кліматичних режимів:

- 1) експлуатаційний
- 2) максимальної температури
- 3) мінімальної температури
- 4) максимальної ожеледі
- 5) максимального вітру
- 6) вітру під час ожеледі
- 7) грозового періоду
- 8) монтажний

Розглянемо стан проводу в експлуатаційному режимі повітряної лінії.

Розрахункові параметри проводу в даному режимі становлять

| | |
|---------------------|--|
| питоме навантаження | $\gamma := \gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| температура проводу | $t := t_e = 8 \text{ }^\circ\text{C}$ |

Напруження проводу визначимо за виразом (3.21):

$$A := \frac{1}{24} \gamma^2 \cdot E \cdot l^2 = (2.482 \cdot 10^5) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t - t_0) = 29.763 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 63.009 \text{ МПа}$$

$$\sigma := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9 C} = 74.492 \text{ МПа}$$

Стріла провисання проводу в даному режимі становить

$$f := \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \sigma} = 3.565 \text{ м}$$

В аналогічний спосіб виконуємо розрахунки стану проводу для решти розрахункових кліматичних режимів. Для виконання таких обчислень сформуємо матрицю параметрів розрахункових режимів повітряної лінії

| режим | t | γ |
|------------------|-----------|------------|
| експлуатаційний | t_e | γ_1 |
| макс.температури | t_{max} | γ_1 |
| мін.температури | t_{min} | γ_1 |
| макс.ожеледі | t_o | γ_3 |
| макс.вітру | t_o | γ_6 |
| вітер_ожеледь | t_o | γ_7 |
| грозовий_період | 15 °C | γ_1 |
| монтажний | -15 °C | γ_1 |

Для розрахунку напруження проводу у розрахункових режимах організуємо циклічні обчислення за виразом (3.21)

$$\sigma := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in \text{експлуатаційний} \dots \text{монтажний} \\ \left\| \begin{array}{l} A_i \leftarrow \frac{1}{24} \gamma_i^2 \cdot E \cdot l^2 \\ B_i \leftarrow \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 E \cdot l^2}{24 \sigma_0^2} - \alpha \cdot E \cdot (t_i - t_0) \\ C_i \leftarrow \sqrt[3]{\frac{A_i}{2} + \frac{B_i^3}{27}} + \sqrt{\frac{A_i^2}{4} + \frac{A_i B_i^3}{27}} \\ \sigma_i \leftarrow \frac{B_i}{3} + C_i + \frac{B_i^2}{9 C_i} \end{array} \right\| \\ \sigma \leftarrow \sigma \end{array} \right\|$$

Таким чином, вектор-стовпці напружень проводу та стріл провисання мають вигляд

$$\sigma = \begin{bmatrix} 74.492 \\ 58.339 \\ 117.452 \\ 130.149 \\ 91.288 \\ 135 \\ 69.727 \\ 94.179 \end{bmatrix} \text{ МПа} \quad f := \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \sigma} = \begin{bmatrix} 3.565 \\ 4.552 \\ 2.261 \\ 4.761 \\ 3.41 \\ 4.904 \\ 3.808 \\ 2.82 \end{bmatrix} \text{ м}$$

Результати виконання систематичного розрахунку проводу зведемо в таблицю

| режим | t (°C) | γ $\left(\frac{\text{кПа}}{\text{м}}\right)$ | σ (МПа) | f (м) |
|------------------|-------------|--|-------------------|------------|
| експлуатаційний | 8 | 33.99 | 74.492 | 3.565 |
| макс.температури | 36 | 33.99 | 58.339 | 4.552 |
| мін.температури | -36 | 33.99 | 117.452 | 2.261 |
| макс.ожеледі | -5 | 79.317 | 130.149 | 4.761 |
| макс.вітру | -5 | 39.846 | 91.288 | 3.41 |
| вітер_ожеледь | -5 | 84.737 | 135 | 4.904 |
| грозовий_період | 15 | 33.99 | 69.727 | 3.808 |
| монтажний | -15 | 33.99 | 94.179 | 2.82 |

Зазначимо, що в режимах максимального вітру та вітру під час ожеледі стріли провисання розраховано у нахилений площині, обумовлений відхиленням проводу під натиском вітру.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодному розрахунковому режимі механічні напруження не перевищують допустимих значень, що вказує на правильність вибору вихідного кліматичного режиму.

Задача 11.

Повітряна лінія напругою 110 *кВ* виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатограних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Висота закріплення проводів нижнього ярусу над землею дорівнює 13,72 *м*. В режимі максимальної температури температура проводу становить +36°*С*. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Визначити режим максимальної стріли провисання проводу та розрахувати довжину габаритного прогону.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

модуль пружності $E := 82.5 \text{ ГПа}$

коефіцієнт теплового здовження $\alpha := 19.2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$

висота закріплення проводу $h_0 = 13.72 \text{ м}$

Питомі навантаження, які зазнає провід

від власної ваги $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

від ваги проводу, вкритого ожеледдю $\gamma_3 = 79.317 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$

Напруження проводу в режимах

максимальної температури $\sigma_{Tmax} = 58.339 \text{ МПа}$

максимальної ожеледі $\sigma_{Omax} = 130.149 \text{ МПа}$

Температурні режими проводу

максимальна температура $t_{max} := 36 \text{ }^\circ\text{С}$

температура під час ожеледі $t_o := -5 \text{ }^\circ\text{С}$

Критична температура за виразом (3.41) дорівнює

$$t_{\kappa} := t_o + \frac{\sigma_{Omax}}{\alpha \cdot E} \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_3} \right) = 42 \text{ }^\circ\text{С}$$

Очевидно, критична температура перевищує максимальну

$$t_k > t_{max} \quad 42 \text{ } ^\circ\text{C} > 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Це означає, що найбільша стріла провисання проводу має місце в режимі максимальної ожеледі, що підтверджують результати розв'язання задачі 10.

Визначимо довжину габаритного прогону виходячи із забезпечення нормованого габариту лінії напругою 110 **кВ** для ненаселеної місцевості (див. табл. А.15)

$$G = 6 \text{ м}$$

За виразом (5.1) довжина габаритного прогону становить

$$l_{gab} := \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_{Omax} \cdot (h_0 - G)}{\gamma_3}} = 318.34 \text{ м}$$

Це означає, що у разі розташування опор на ідеально рівній місцевості відстань між опорами не має перевищувати 318,341 **м**.

Задача 12.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Лінія захищена грозозахисним тросом ОКГТ-Ц-24, змонтованим за допомогою неізольованого тросового кріплення.

Траса повітряної лінії проходить по ненаселеній сільській місцевості II типу, яку віднесено до 3 району за ожеледдю, 1 району за вітровим навантаженням, 2 району за вітровим натиском під час вітру, 1 району за максимальною температурою, 8 району за мінімальною температурою, 3 району за середньорічною температурою.

Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

*Виконати механічний розрахунок грозозахисного тросу в прогоні довжиною 250 **м**.*

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

довжина прогону

$$l := 250 \text{ м}$$

Стріли провисання проводу

в експлуатаційному режимі

$$f_e = 3.565 \text{ м}$$

в режимі максимальної температури

$$f_{Tmax} = 4.552 \text{ м}$$

в режимі грозового періоду

$$f_{zp.n} = 3.808 \text{ м}$$

Технічні параметри тросу ОКГТ-Ц-24 складають

розрахунковий переріз

$$F_m := 70.9 \text{ мм}^2$$

зовнішній діаметр

$$d_m := 11.2 \text{ мм}$$

погонна маса

$$m_m := 476 \frac{\text{кг}}{\text{км}}$$

модуль пружності

$$E_m := 119 \text{ ГПа}$$

коефіцієнт теплового здовження

$$\alpha_m := 12.7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$$

Допустимі напруження тросу

в режимі максимальних навантажень

$$\sigma_{max} := 623.5 \text{ МПа}$$

в експлуатаційному режимі

$$\sigma_{me} := 378 \text{ МПа}$$

Характеристичні значення кліматичних навантажень

товщина стінки ожеледі

$$b := 19 \text{ мм}$$

швидкісний натиск вітру

$$q := 400 \text{ Па}$$

натиск вітру під час ожеледі

$$q' := 200 \text{ Па}$$

Температурні режими повітряної лінії

максимальна температура

$$t_{max} := 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

мінімальна температура

$$t_{min} := -36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

температура під час ожеледі

$$t_o := -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

середньорічна температура

$$t_e := 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Геометричні розміри взаємного розташування тросу та проводу у верхньому ярусі (див. рис. В.2 та В.3) становлять

| | |
|--|-------------------------------------|
| висота верхньої траверси | $h_3 := 19 \text{ м}$ |
| висота тросостійки | $h_m := 3.3 \text{ м}$ |
| висота закріплення тросового кріплення | $h_4 := h_3 + h_m = 22.3 \text{ м}$ |
| винос верхньої траверси | $a_3 := 2.3 \text{ м}$ |
| довжина ізоляційного підвісу | $\lambda := 1280 \text{ мм}$ |

Для визначення одиничних та питомих навантажень, які зазнає грозозахисний трос, необхідно розрахувати середню висоту розташування тросу над поверхнею землі. Взаємне розташування проводів верхнього ярусу та грозозахисного тросу визначається контрукцією проміжної опори (див. рис. В.2) та будівельною висотою ізоляційного підвісу проводів (див. рис. В.3)

Різниця висот точок закріплення грозозахисного тросу та проводів верхнього ярусу на опорі становить

$$\Delta h_m := h_m + \lambda = 4.58 \text{ м}$$

Мінімально допустиму відстань між грозозахисним тросом та проводом в середині прогону визначимо за даними табл. 3.18 методом лінійної інтерполяції для розрахункового прогону

| l (м) | z (м) |
|------------|------------|
| 200 | 4.0 |
| 300 | 5.5 |

$$z_m := z_0 + \frac{(l - l_{-0})}{(l_{-1} - l_{-0})} (z_1 - z_0) = 4.75 \text{ м}$$

Висоту розташування центру мас тросу визначимо для вихідного режиму грозозахисного тросу – режиму грозового періоду. В такому режимі стріла провисання тросу становить

$$f_{m0} := f_{zp.n} + \Delta h_m - z_m = 3.638 \text{ м}$$

Висота розташування центру мас тросу дорівнює

$$h_{mc} := h_4 - \frac{2}{3} f_{m0} = 19.875 \text{ м}$$

Визначимо одиничні та питомі навантаження, які зазнає трос в експлуатаційних режимах повітряної лінії з урахуванням середнього періоду повторюваності навантажень 15 років (див. дані табл. 3.1)

1. Навантаження від власної ваги тросу

Відповідно до виразів (3.1) та (3.2) одиничні та питомі навантаження від власної ваги тросу становлять:

$$p_{m1} := g \cdot m_m = 4.67 \frac{H}{m} \quad \gamma_{m1} := \frac{p_{m1}}{F_m} = 65.839 \frac{кПа}{м}$$

2. Навантаження від ваги ожеледі.

Поправковий коефіцієнт за висотою розташування тросу визначимо за методом лінійної інтерполяції даних, наведених в табл. 3.5:

| h (m) | k |
|----------------|-----|
| 10 | 1.0 |
| 20 | 1.2 |

$$k := k_0 + \frac{(h_{mc} - h_0) \cdot (k_1 - k_0)}{h_1 - h_0} = 1.197$$

В аналогічний спосіб визначимо поправковий коефіцієнт щодо діаметру тросу

| $diam$ (mm) | μ |
|--------------------|-------|
| 5 | 1.1 |
| 10 | 1.0 |

$$\mu := \mu_0 + \frac{(d_m - diam_0) \cdot (\mu_1 - \mu_0)}{diam_1 - diam_0} = 0.976$$

Таким чином, відповідно до виразу (3.5) одиничне навантаження від ваги відкладень ожеледі становить

$$p_{m2} := \rho \cdot g \cdot \gamma_{fm} \cdot \pi \cdot k \cdot \mu \cdot b \cdot (d_m + k \cdot \mu \cdot b) = 14.398 \frac{H}{m}$$

Тут і в подальшому під час розв'язання задачі використано такі самі коефіцієнти надійності за кліматичними навантаженнями, що й під час розрахунку навантажень на провода повітряної лінії (див. задачу 6).

3. Сумарне навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю.

Відповідно до виразу (3.6) одиничні та питомі навантаження від ваги проводу, вкритого ожеледдю становлять:

$$p_{m3} := p_{m1} + p_{m2} = 19.066 \frac{H}{m} \quad \gamma_{m3} := \frac{p_{m3}}{F_m} = 268.92 \frac{кПа}{m}$$

4. Навантаження від натиску вітру.

Оскільки діаметр тросу менший за 20 мм, аеродинамічний коефіцієнт становить

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнту динамічності натиску вітру приймаємо таким самим, що й в розрахунках проводу (див. задачу 6)

$$C_{dc} = 1.249$$

Коефіцієнт висоти розташування тросу визначаємо з урахуванням параметрів табл. 3.12:

$$C_h := 1 \cdot (0.1 \cdot h_{mc} \cdot m^{-1})^{2 \cdot 0.15} = 1.229$$

Отже, відповідно до виразу (3.11) коефіцієнт впливу розташування тросу становить

$$C_c := C_h \cdot C_R \cdot C_{DIR} = 1.229$$

Таким чином, відповідно до виразу (3.9) одиничне навантаження від натиску вітру дорівнює

$$p_{m4} := \gamma_{fmax} \cdot C_x \cdot C_{dc} \cdot C_c \cdot q \cdot d_m = 6.6 \frac{H}{m}$$

5. Навантаження від натиску вітру на трос, вкритий ожеледдю

Оскільки в даному режимі трос вкритий ожеледдю, аеродинамічний коефіцієнт дорівнює

$$C_x := 1.2$$

Коефіцієнту динамічності натиску вітру приймаємо таким самим, що й в розрахунках проводу (див. задачу 6)

$$C'_{dc} = 1.556$$

Коефіцієнт впливу розташування тросу залишається таким самим, що й в режимі максимального вітру.

Таким чином, відповідно до виразу (3.12) одиничне навантаження від натиску вітру під час ожеледі становить

$$p_{m5} := \gamma_{fQ} \cdot C_x \cdot C'_{dc} \cdot C_c \cdot q' \cdot d_m = 3.649 \frac{H}{m}$$

6. Сумарне навантаження від ваги тросу та натиску вітру.

Відповідно до виразів (3.13) одиничне та питоме навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю становлять

$$p_{m6} := \sqrt{p_{m1}^2 + p_{m4}^2} = 8.084 \frac{H}{m} \quad \gamma_{m6} := \frac{p_{m6}}{F_m} = 114.022 \frac{кПа}{м}$$

7. Сумарне навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю та натиску вітру.

Відповідно до виразів (3.14) одиничні та питомі навантаження від ваги тросу, вкритого ожеледдю та натиску вітру становлять:

$$p_{m7} := \sqrt{(p_{m1} + 0.9 p_{m2})^2 + p_{m5}^2} = 18 \frac{H}{m} \quad \gamma_{m7} := \frac{p_{m7}}{F_m} = 253.885 \frac{кПа}{м}$$

Напругення тросу у вихідному режимі грозового періоду за виразом (3.43) дорівнює

$$\sigma_{m0} := \frac{\gamma_{m1} \cdot l^2}{8 f_{m0}} = 141.387 \text{ МПа}$$

Кут захисту лінії в середині прогону становить

$$\alpha_0 := \text{atan} \left(\frac{a_3}{z_m} \right) = 25.8^\circ$$

Визначимо стан тросу у розрахункових кліматичних режимах:

- 1) експлуатаційний
- 2) максимальної температури
- 3) мінімальної температури
- 4) максимальної ожеледі
- 5) максимального вітру
- 6) вітру під час ожеледі

В розрахунках будемо використовувати такі параметри вихідного режиму

| | |
|---------------------|--|
| питоме навантаження | $\gamma_{m0} := \gamma_{m1} = 65.839 \frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}$ |
| температура тросу | $t_{m0} := 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| напруження тросу | $\sigma_{m0} = 141.387 \text{ МПа}$ |

Розглянемо стан тросу в експлуатаційному режимі повітряної лінії. Розрахункові параметри тросу в такому режимі становлять

| | |
|---------------------|---|
| питоме навантаження | $\gamma_m := \gamma_{m1} = 65.839 \frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}$ |
| температура тросу | $t_m := t_e = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ |

Напруження тросу визначимо за виразом (3.21):

$$A := \frac{1}{24} \gamma_m^2 \cdot E_m \cdot l^2 = (1.343 \cdot 10^6) \text{ МПа}^3$$

$$B := \sigma_{m0} - \frac{\gamma_{m0}^2 E_m \cdot l^2}{24 \sigma_{m0}^2} - \alpha_m \cdot E_m \cdot (t_m - t_{m0}) = 84.767 \text{ МПа}$$

$$C := \sqrt[3]{\frac{A}{2} + \frac{B^3}{27}} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + \frac{A \cdot B^3}{27}} = 111.55 \text{ МПа}$$

$$\sigma_m := \frac{B}{3} + C + \frac{B^2}{9 C} = 146.963 \text{ МПа}$$

Стріла провисання тросу в даному режимі становить

$$f_m := \frac{\gamma_m \cdot l^2}{8 \sigma_m} = 3.5 \text{ м}$$

В аналогічний спосіб виконуємо розрахунки стану тросу для решти розрахункових кліматичних режимів. Для виконання таких обчислень сформуємо матрицю параметрів розрахункових режимів повітряної лінії

| <i>режим</i> | t_m | γ_m |
|-------------------------|-----------|---------------|
| <i>експлуатаційний</i> | t_e | γ_{m1} |
| <i>макс.температури</i> | t_{max} | γ_{m1} |
| <i>мін.температури</i> | t_{min} | γ_{m1} |
| <i>макс.ожеледі</i> | t_o | γ_{m3} |
| <i>макс.вітру</i> | t_o | γ_{m6} |
| <i>вітер_ожеледь</i> | t_o | γ_{m7} |

Для розрахунку напруження тросу у розрахункових режимах організуємо циклічні обчислення за виразом (3.21)

$$\sigma_m := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in \text{експлуатаційний} \dots \text{вітер_ожеледь} \\ \left\| \begin{array}{l} A_i \leftarrow \frac{1}{24} \gamma_{m_i}^2 \cdot E_m \cdot l^2 \\ B_i \leftarrow \sigma_{m0} - \frac{\gamma_{m0}^2 E_m \cdot l^2}{24 \sigma_{m0}^2} - \alpha_m \cdot E_m \cdot (t_{m_i} - t_{m0}) \\ C_i \leftarrow \sqrt[3]{\frac{A_i}{2} + \frac{B_i^3}{27}} + \sqrt{\frac{A_i^2}{4} + \frac{A_i B_i^3}{27}} \\ \sigma_i \leftarrow \frac{B_i}{3} + C_i + \frac{B_i^2}{9 C_i} \end{array} \right\| \\ \sigma_m \leftarrow \sigma \end{array} \right\|$$

Таким чином, вектор-стовпці напружень тросу та стріл провисання мають вигляд

$$\sigma_m = \begin{bmatrix} 146.963 \\ 126.455 \\ 188.907 \\ 321.387 \\ 202.585 \\ 310.973 \end{bmatrix} \text{ МПа} \qquad f_m := \frac{\gamma_m \cdot l^2}{8 \sigma_m} = \begin{bmatrix} 3.5 \\ 4.068 \\ 2.723 \\ 6.537 \\ 4.397 \\ 6.378 \end{bmatrix} \text{ м}$$

Результати виконання систематичного розрахунку тросу зведемо в таблицю

| <i>режим</i> | <i>t</i> (°C) | γ_m $\left(\frac{\kappa\text{Па}}{\text{м}}\right)$ | σ_m (МПа) | f_m (м) |
|-------------------------|------------------|---|---------------------|--------------|
| <i>експлуатаційний</i> | 8 | 65.839 | 146.963 | 3.5 |
| <i>макс.температури</i> | 36 | 65.839 | 126.455 | 4.068 |
| <i>мін.температури</i> | -36 | 65.839 | 188.907 | 2.723 |
| <i>макс.ожеледі</i> | -5 | 268.92 | 321.387 | 6.537 |
| <i>макс.вітру</i> | -5 | 114.022 | 202.585 | 4.397 |
| <i>вітер_ожеледь</i> | -5 | 253.885 | 310.973 | 6.378 |

Визначимо відстань між проводом та тросом та кут захисту лінії в середині прогону в режимі максимальної температури

$$z_{m.Tmax} := f_{Tmax} - f_{m.Tmax} + \Delta h_m = 5.064 \text{ м}$$

$$\alpha_0 := \text{atan}\left(\frac{a_3}{z_{m.Tmax}}\right) = 24.4^\circ$$

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що в жодному кліматичному режимі не порушено технологічні вимоги до конструкції грозозахисного тросу.

Зазначимо, що відстань між тросом та проводом та кут захисту лінії розраховано тільки для режиму максимальної температури, оскільки інші режими не характеризуються грозовою активністю.

Задача 13.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Довжини вагового та вітрового прогонів становлять 250 м. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Виконати перевірку ізоляційних підвісів на механічну міцність, визначити кут нахилу підтримуючого підвісу в режимі максимального вітру та перевірити наближення проводу до траверси опори.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

довжина вагового прогону $l_{ваз} := 250 \text{ м}$

довжина вітрового прогону $l_{вiтp} := 250 \text{ м}$

Одиничні навантаження:

від власної ваги $p_1 = 9.336 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

від натиску вітру $p_4 = 9.469 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

в режимі макс. навантажень $p_{max} := p_7 = 23.275 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

Напруження проводу:

в експлуатаційному режимі $\sigma_e = 74.492 \text{ МПа}$

в режимі макс. навантажень $\sigma_{max} = 135 \text{ МПа}$

Технічні параметри лінійного ізолятора ЛК 70/110-3

будівельна висота $\lambda := 1280 \text{ мм}$

маса $m_z := 3.65 \text{ кг}$

гарантоване руйнівне навантаження $R := 70 \text{ кН}$

Визначимо навантаження, які зазнають підтримуючі ізоляційні підвіси в експлуатаційному режимі та режимі максимальних навантажень із урахуванням відповідних коефіцієнтів запасу міцності (див. вирази (3.44)):

$$5 (p_1 \cdot l_{ваз} + g \cdot m_z) = 11.849 \text{ кН} \quad 11.849 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

$$2.5 (p_{max} \cdot l_{ваз} + g \cdot m_z) = 14.636 \text{ кН} \quad 14.636 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

Отримані результати свідчать про те, що в досліджуваних режимах механічні навантаження на ізоляційні підвіси не перевищують гарантованого руйнівного навантаження з урахуванням відповідних коефіцієнтів запасу.

Аналогічні розрахунки за виразами (3.55) для натяжних ізоляційних підвісів дають наступні значення навантажень:

$$5 \sqrt{(\sigma_e \cdot F)^2 + \left(p_1 \cdot \frac{l_{\text{ваз}}}{2} + g \cdot m_z\right)^2} = 123.748 \text{ кН} \quad 102.452 \text{ кН} > 70 \text{ кН}$$

$$2.5 \sqrt{(\sigma_{\text{max}} \cdot F)^2 + \left(p_{\text{max}} \cdot \frac{l_{\text{ваз}}}{2} + g \cdot m_z\right)^2} = 92.993 \text{ кН} \quad 92.992 \text{ кН} > 70 \text{ кН}$$

Для натяжних підвісів механічні навантаження у розрахункових режимах перевищують гарантоване руйнівне навантаження ізоляторів, що визначає необхідність застосування дволанцюгових підвісів на анкерних опорах лінії.

Відповідно до виразу (3.46) кут відхилення підтримуючого ізоляційного підвісу під натиском вітру становить

$$\varphi := \text{atan} \left(\frac{p_4 \cdot l_{\text{випр}}}{p_1 \cdot l_{\text{ваз}} + 0.5 g \cdot m_z} \right) = 45.2^\circ$$

Тут враховано одиничне значення коефіцієнту коливання ізоляційного підвісу для швидкісного натиску вітру 400 Па (див. задачу 6).

Наближення проводу до траверси опори дорівнює

$$z := \lambda \cdot \cos(\varphi) = 90.215 \text{ см}$$

Таке наближення не порушує обмеження щодо найменших ізоляційних відстаней по повітрю між проводом та опорою. Відповідно до даних табл. 3.22 за умовами внутрішніх перенапруг така найменша відстань становить

$$z_{\text{min}} := 80 \text{ см} \quad 90.215 \text{ см} > 80 \text{ см}$$

Нормована найменша відстань між проводом та траверсою опори визначає гранично допустиме значення кута відхилення ізоляційного підвісу

$$\varphi_{\text{max}} := \arccos \left(\frac{z_{\text{min}}}{\lambda} \right) = 51.3^\circ \quad 45.2^\circ < 51.3^\circ$$

Задача 14.

Повітряна лінія напругою 110 κB виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Анкерована ділянка повітряної лінії складається з п'яти прогонів, довжини яких дорівнюють 260, 240, 245, 255 та 250 m відповідно. Параметри доаварійного режиму відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Розрахувати редуковане тяжіння, коефіцієнт редуції та стрілу провисання проводу в першому та третьому прогонах для аварійного режиму, обумовленого обривом проводу у другому прогоні.

Відповідно до умов задачі технічні та експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 становлять

Довжини прогонів

$$l_1 := 260 \text{ м} \quad l_2 := 240 \text{ м} \quad l_3 := 245 \text{ м} \quad l_4 := 255 \text{ м} \quad l_5 := 250 \text{ м}$$

розрахунковий переріз

$$F := 274.67 \text{ мм}^2$$

модуль пружності

$$E := 82.5 \text{ ГПа}$$

одиничне вагове навантаження

$$p_0 := p_1 = 9.336 \frac{H}{m}$$

напруження

$$\sigma_0 := \sigma_e = 74.492 \text{ МПа}$$

Тяжіння проводу в доаварійному режимі становить

$$H_0 := \sigma_0 \cdot F = 20.461 \text{ кН}$$

Розрахуємо спочатку редуковане тяжіння у першому прогоні анкерованої ділянки.

Для визначення початкового наближення редукованого тяжіння в аварійному режимі повітряної лінії виконаємо графоаналітичне розв'язання рівняння (4.6), в діапазоні тяжінь

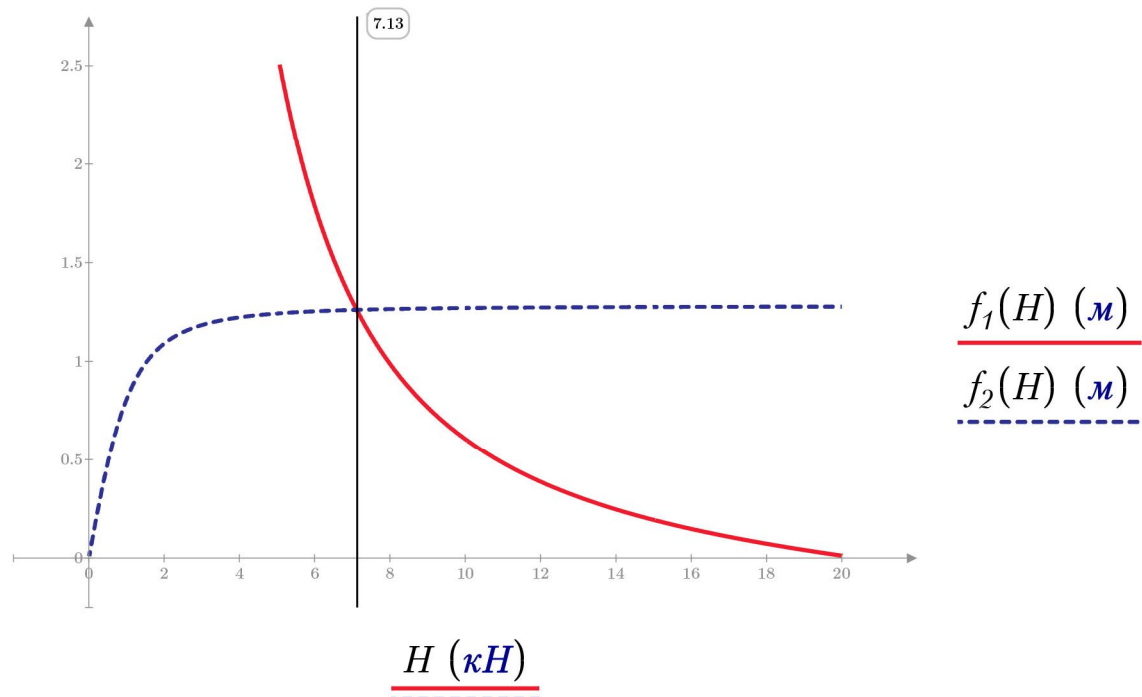
$$H := 0 \text{ кН}, 0.01 \text{ кН} \dots 20 \text{ кН}$$

Визначимо функції залежності лівої та правої частин рівняння (4.6) від редукованого тяжіння

$$f_1(H) := \frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right)$$

$$f_2(H) := \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot m_z}{2 H} \right)^2}}$$

та сформуємо графіки цих функцій



Точка перстину кривих визначає шуканий розв'язок поставленої задачі. Наближене значення редукованого тяжіння становить 7,13 κH . Це значення будемо використовувати як початкове наближення в числовому розв'язанні рівняння (4.6).

$$H := 7.13 \kappa H$$

$$\frac{l_1}{E \cdot F} (H_0 - H) - \frac{p_0^2 l_1^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H^2} \right) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_1 + g \cdot m_z}{2 H} \right)^2}}$$

$$H_1 := \text{find}(H) = 7.116 \kappa H$$

Коефіцієнт редукції та стріла провисання проводу в аварійному режимі в першому прогоні становлять

$$k_1 := \frac{H_1}{H_0} = 0.348 \qquad f_1 := \frac{p_0 \cdot l_1^2}{8 H_1} = 11.086 \text{ м}$$

Для розрахунку редукованого тяжіння в третьому прогоні анкерованої ділянки сформуємо систему алгебраїчних рівнянь, які визначають взаємний зв'язок редукованих тяжінь вцілілих прогонів:

$$\begin{aligned} \frac{l_3}{E \cdot F} (H_0 - H_3) - \frac{p_0^2 l_3^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_3^2} \right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + g \cdot m_z}{2 H_3} \right)^2}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \\ \frac{l_4}{E \cdot F} (H_0 - H_4) - \frac{p_0^2 \cdot l_4^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_4^2} \right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \\ \frac{l_5}{E \cdot F} (H_0 - H_5) - \frac{p_0^2 \cdot l_5^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_5^2} \right) &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \end{aligned}$$

Зазначимо, що в наведених виразах двоскладові праві частини визначають відхилення ізоляційних підвісів на опорах, суміжних із відповідним прогоном. Останнє рівняння містить однокладову паву частинну, оскільки п'ятий прогін суміжний з анкерною опорою, для якої переміщення точки закріплення проводу зневажливо мале.

Для розв'язання отриманої системи рівнянь скористуємось методом Ньютона. Самі рівняння визначають нев'язки змін довжин прогонів в аварійному режимі:

$$\begin{aligned}
F_3(H_3, H_4) &:= \frac{l_3}{E \cdot F} (H_0 - H_3) - \frac{p_0^2 l_3^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_3^2} \right) - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 H_3} \right)^2}} \\
&\quad + \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} \\
F_4(H_3, H_4, H_5) &:= \frac{l_4}{E \cdot F} (H_0 - H_4) - \frac{p_0^2 l_4^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_4^2} \right) \leftarrow \\
&\quad - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2}} + \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}} \\
F_5(H_4, H_5) &:= \frac{l_5}{E \cdot F} (H_0 - H_5) - \frac{p_0^2 l_5^3}{24} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_5^2} \right) \leftarrow \\
&\quad - \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 (H_5 - H_4)} \right)^2}}
\end{aligned}$$

Частинні похідні по відповідним редукованим тяжінням від нев'язок визначають діагональні елементи матриці Якобі

$$\begin{aligned}
F'_3(H_3, H_4) &:= -\frac{l_3}{E \cdot F} - \frac{p_0^2 l_3^3}{12 H_3^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot l_3 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z)^2}{4 H_3^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot l_3 + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 H_3} \right)^2 \right)^3}} \leftarrow \\
&\quad - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + \mathbf{g} \cdot \mathbf{m}_z}{2 (H_4 - H_3)} \right)^2 \right)^3}}
\end{aligned}$$

$$F'_4(H_3, H_4, H_5) := -\frac{l_4}{E \cdot F} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z}{2 (H_4 - H_3)}\right)^2\right)^3}} \downarrow$$

$$-\frac{p_0^2 l_4^3}{12 H_4^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}}$$

$$F'_5(H_4, H_5) := -\frac{l_5}{E \cdot F} - \frac{p_0^2 l_5^3}{12 H_5^3} - \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}}$$

Недіагональні елементи матриці Якобі визначаються виразами

$$F'_{34}(H_3, H_4) := \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z)^2}{4 (H_4 - H_3)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_3 + l_4) + g \cdot m_z}{2 (H_4 - H_3)}\right)^2\right)^3}}$$

$$F'_{45}(H_4, H_5) := \frac{\lambda \cdot (p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z)^2}{4 (H_5 - H_4)^3 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{p_0 \cdot (l_4 + l_5) + g \cdot m_z}{2 (H_5 - H_4)}\right)^2\right)^3}}$$

$$F'_{43}(H_3, H_4) := F'_{34}(H_3, H_4) \qquad F'_{54}(H_4, H_5) := F'_{45}(H_4, H_5)$$

За початкове наближення тяжіння проводу у прогоні, суміжному з аварійною ділянкою, прийємо округлене значення тяжіння, визначене для першого прогону – 7 **кН**. Для решти прогонів початкові наближення прийємо на 2 **кН** (25-30%) більше попереднього. Ітераційне уточнення редукованих тяжінь на вцілілих прогонах визначається наступним алгоритмом

$$\begin{array}{l}
 H_3 := \left\| \begin{array}{l} H \leftarrow \begin{bmatrix} 7 \\ 9 \\ 11 \end{bmatrix} \kappa H \\ \Delta \leftarrow 1 \kappa H \\ \text{while } \Delta > 0.001 \kappa H \\ \left\| \begin{array}{l} W_0 \leftarrow F_3(H_0, H_1) \\ W_1 \leftarrow F_4(H_0, H_1, H_2) \\ W_2 \leftarrow F_5(H_1, H_2) \\ J_{0,0} \leftarrow F'_3(H_0, H_1) \\ J_{0,1} \leftarrow F'_{34}(H_0, H_1) \\ J_{1,0} \leftarrow F'_{43}(H_0, H_1) \\ J_{1,1} \leftarrow F'_4(H_0, H_1, H_2) \\ J_{1,2} \leftarrow F'_{45}(H_1, H_2) \\ J_{2,1} \leftarrow F'_{54}(H_1, H_2) \\ J_{2,2} \leftarrow F'_5(H_1, H_2) \\ \Delta H \leftarrow J^{-1} W \\ H \leftarrow H - \Delta H \\ \Delta \leftarrow \max(|\Delta H|) \end{array} \right\| \\ H_3 \leftarrow H_1 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Таким чином, редуковане тяжіння, коефіцієнт редукції та стріла провисання проводу для третього прогону в аварійному режимі повітряної лінії становлять

$$H_3 = 11.577 \kappa H \quad k_3 := \frac{H_3}{H_0} = 0.566 \quad f_3 := \frac{p_0 \cdot l_3^2}{8 H_3} = 6.051 \mathcal{M}$$

Задача 15.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Два суміжних прогони характеризуються довжинами 260 і 240 **м** відповідно. Перепади висот точок закріплення проводу на опорах, які обмежують прогони, 15 та 10 **м** таким чином, що точка закріплення проводу на середній опорі знаходиться на нижній відмітці. Експлуатаційні параметри проводу відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Визначити можливість виникнення явища «виривання» опори в режимі мінімальних температур та у разі необхідності передбачити заходи щодо запобігання «вириванню» опори.

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 в режимах мінімальних температур та максимального вітру становлять:

| | |
|---|--|
| питоме вагове навантаження | $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| одиничне навантаження від натиску вітру | $p_4 = 9.469 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ |
| напруження проводу | $\sigma_{Tmin} = 117.452 \text{ МПа}$ |

Геометричні характеристики способу закріплення проводу у суміжних прогонах складають:

| | |
|----------------------------------|---|
| розрахунковий переріз проводу | $F = 274.67 \text{ мм}^2$ |
| довжини прогонів | $l_1 = 260 \text{ м} \quad l_2 = 240 \text{ м}$ |
| перепади висот точок закріплення | $\Delta h_{12} := 15 \text{ м} \quad \Delta h_{32} := 10 \text{ м}$ |

Відповідно до виразу (5.3) вертикальна відстань між точкою закріплення проводу на опорі №1 та кривою мінімального шаблону над опорою №2 становить

$$\Delta := \frac{\gamma_1 \cdot l_1 \cdot l_2}{2 \sigma_{Tmin}} + \frac{(\Delta h_{12} - \Delta h_{32}) l_1}{l_1 + l_2} = 11.629 \text{ м}$$

Порівняння отриманого значення вертикальної відстані з перепадом висот точок закріплення проводу на опорах №1 та 2 свідчить про те, що в режимі мінімальних температур

спостерігається явище "виривання" опори №2.

$$\Delta < \Delta h_{12} \quad 11.629 \text{ м} < 15 \text{ м}$$

Вертикальна складова тяжіння, направлена на «виривання» опори №2 за виразом (5.9) дорівнює

$$V := \sigma_{Tmin} \cdot F \cdot \left(\frac{\Delta h_{12}}{l_1} + \frac{\Delta h_{32}}{l_2} \right) - \frac{p_1}{2} (l_1 + l_2) = 0.871 \text{ кН}$$

Вагу баласту визначимо виходячи з умов забезпечення гранично допустимого кута відхилення ізоляційного підвісу за умовами наближення проводу до траверси опори (див. задачу 13)

$$\varphi_{max} = 51.3^\circ$$

Відповідно до виразу (5.10) вага баласту має бути не меншою за

$$G_{min} := V + \frac{p_4}{\tan(\varphi_{max})} \frac{l_1 + l_2}{2} = 2.767 \text{ кН} \quad \frac{G_{min}}{g} = 282.124 \text{ кг}$$

Тут враховано одиничне значення коефіцієнту коливання ізоляційного підвісу для швидкісного натиску вітру 400 Па (див. задачу 6).

Для забезпечення нормованого кута відхилення ізоляційного підвісу обираємо баласт типу БЛ-400-1 із шістьма тягарцями загальною масою

$$m_6 := 300 \text{ кг}$$

Перевіримо механічну міцність ізоляційного підвісу у разі закріплення на ньому обраного баласту.

Для оціночного розрахунку довжину вагового прогону умовно дорівнюємо до довжини вітрового прогону.

$$l_{ваз} := 0.5 (l_1 + l_2) = 250 \text{ м}$$

Відповідно до виразів (3.43) механічний розрахунок підтримуючих ізоляційних підвісів полягає у контролі обмежень

$$5 (p_1 \cdot l_{ваз} + g \cdot (m_z + m_6)) = 26.559 \text{ кН} \quad 26.559 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

$$2.5 (p_{max} \cdot l_{ваз} + g \cdot (m_z + m_6)) = 21.991 \text{ кН} \quad 21.991 \text{ кН} < 70 \text{ кН}$$

Таким чином, для запобігання виривання, на кожному ізоляційному підвісі опори, розташованій на нижній відмітці, необхідно закріпити баласты типу БЛ-400-1 із шістьма тягарцями загальною масою 300 кг.

Задача 16.

Повітряна лінія напругою 110 кВ виконана проводами марки АС-240/39, змонтованими на проміжних багатогранних опорах ПМ-110-3ф з використанням підвісних лінійних ізоляторів ЛК 70/110-IV. Лінія перетинає шосейну дорогу II категорії з відміткою полотна 120 м. До найближчих анкерних опор по обидва боки переходу по два прогони. Довжина прогону переходу становить 245 м, відстань від ближчої опори до вісі дороги дорівнює 120 м, відмітки точок закріплення проводу на опорах однакові та становлять 135 м. Експлуатаційні параметри проводу в нормальних та аварійному режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6, 10 та 14.

Виконати механічний розрахунок переходу повітряної лінії через шосейну дорогу.

Відповідно до умов задачі експлуатаційні характеристики проводу АС-240/39 в режимах максимальних температур та аварійному становлять:

| | |
|--|--|
| питоме вагове навантаження | $\gamma_1 = 33.99 \frac{\text{кПа}}{\text{м}}$ |
| напруження проводу | $\sigma_{Tmax} = 58.339 \text{ МПа}$ |
| редуковане тяжіння в аварійному режимі | $H_2 = 11.577 \text{ кН}$ |

Геометричні характеристики способу закріплення проводу у прогоні складають:

| | |
|------------------------------------|---|
| розрахунковий переріз проводу | $F = 274.67 \text{ мм}^2$ |
| довжина прогону | $l_3 = 245 \text{ м}$ |
| відмітки точок закріплення проводу | $h_3 := 135 \text{ м} \quad h_4 := 135 \text{ м}$ |
| відстань від вісі дороги до опори | $x := 120 \text{ м}$ |
| відмітка полотна дороги | $h_d := 120 \text{ м}$ |

Відповідно до виразу (5.11) стріла провисання проводу над віссю дороги в режимі максимальної температури дорівнює

$$f_x := \frac{\gamma_1 \cdot x}{2 \sigma_{Tmax}} (l_3 - x) = 4.37 \text{ м}$$

В наведеному виразі відсутній другий доданок, оскільки за умовами задачі провід закріплений на опорах, які обмежують перехід, на однакових відмітках.

Габарит над шосейною дорогою становить

$$\Gamma_x := h_4 - f_x - h_{\partial} = 10.63 \text{ м}$$

Отримане занчення перевищує мінімально допустиму відстань

$$\Gamma_{min} := 7 \text{ м} \qquad 10.63 \text{ м} > 7 \text{ м}$$

Це свідчить про дотримання умов виконання переходу лінії через автомобільну дорогу для нормальних режимів лінії.

Аналогічні розрахунки для аварійного режиму у разі обриву проводу у прогоні, суміжному із переходом дають такий результат.

Стріла провисання проводу та габарит над дорогою становлять

$$f_{xa} := \frac{\gamma_1 \cdot F \cdot x}{2 H_3} (l_3 - x) = 6.048 \text{ м} \qquad \Gamma_{xa} := h_4 - f_{xa} - h_{\partial} = 8.952 \text{ м}$$

що перевищує мінімально допустиму відстань

$$\Gamma_{min_a} := 5.5 \text{ м} \qquad 8.952 \text{ м} > 5.5 \text{ м}$$

Отже, за умовами аварійного режиму повітряної лінії вимоги щодо виконання переходу через шосейну дорогу також задовольняються.

Задача 17.

Повітряна лінія напругою 110 **кВ** виконана проводами марки АС-240/39. Анкерована ділянка лінії складається з п'яти прогонів довжинами 260, 240, 245, 255 та 250 **м** відповідно. Експлуатаційні параметри проводу прогону довжиною 250 **м** в нормальних режимах повітряної лінії відповідають результатам розв'язання задач 6 та 10.

Сформуувати монтажні графіки та монтажну таблицю стріл провисання проводу у всіх прогонах анкерованої ділянки.

Відповідно до умов задачі довжини прогонів анкерованої ділянки складають:

$$l_1=260 \text{ м} \quad l_2=240 \text{ м} \quad l_3=245 \text{ м} \quad l_4=255 \text{ м} \quad l_5=250 \text{ м}$$

Температурні режими повітряної лінії становлять:

$$\text{максимальна температура} \quad t_{\max}=36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{мінімальна температура} \quad t_{\min}=-36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{температура монтажного режиму} \quad t_{\text{мнт}}:=-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Стріли провисання проводу в п'ятому прогоні в режимах:

$$\text{максимальної температури} \quad f_{T_{\max}}=4.552 \text{ м}$$

$$\text{монтажному} \quad f_{\text{мнт}}=2.82 \text{ м}$$

За виразами (5.12) визначимо коефіцієнти лінійного поліному монтажного графіку для п'ятого прогону

$$a:=\frac{f_{T_{\max}}-f_{\text{мнт}}}{t_{\max}-t_{\text{мнт}}}=0.034 \frac{\text{м}}{\text{К}} \quad b:=f_{T_{\max}}-a \cdot t_{\max}=-5.947 \text{ м}$$

Зазначимо, що коефіцієнт b визначено виходячи із представлення поточного значення температури у Кельвінах (відповідно до системи СІ). Таким чином, аналітичне представлення функції монтажного графіку п'ятого прогону має вигляд

$$f_5(t):=a \cdot t + b$$

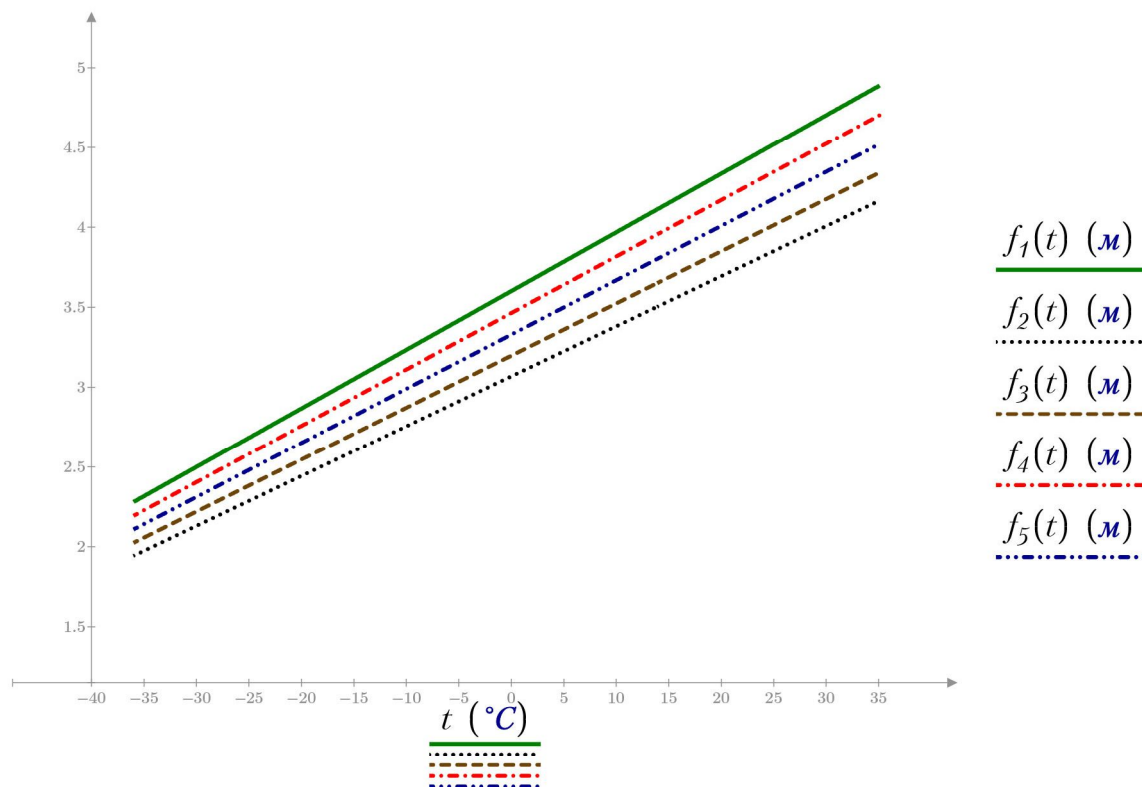
Аналітичні вирази функцій монтажних графіків для решти прогонів сформуємо на підставі виразу (5.13):

$$\begin{aligned} f_1(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_1}{l_5} \right)^2 & f_2(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_2}{l_5} \right)^2 \\ f_3(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_3}{l_5} \right)^2 & f_4(t) &:= f_5(t) \left(\frac{l_4}{l_5} \right)^2 \end{aligned}$$

Сформуємо графіки монтажних стріл провисання в діапазоні робочих температур проводу

$$t := -36 \text{ } ^\circ\text{C}, -35.9 \text{ } ^\circ\text{C} \dots 36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Таким чином, графіки монтажних стріл провисання проводу мають вигляд



Інформацію про монтажні стріли провисання проводу в діапазоні температур від $-35 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $+35 \text{ } ^\circ\text{C}$ із кроком $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ містить також монтажна таблиця.

| t | f_1 | f_2 | f_3 | f_4 | f_5 |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ($^{\circ}\text{C}$) | (м) | (м) | (м) | (м) | (м) |
| –35 | 2.313 | 1.971 | 2.054 | 2.225 | 2.138 |
| –30 | 2.497 | 2.127 | 2.217 | 2.402 | 2.308 |
| –25 | 2.681 | 2.284 | 2.380 | 2.579 | 2.479 |
| –20 | 2.865 | 2.441 | 2.544 | 2.756 | 2.649 |
| –15 | 3.049 | 2.598 | 2.707 | 2.933 | 2.819 |
| –10 | 3.233 | 2.755 | 2.871 | 3.110 | 2.989 |
| –5 | 3.417 | 2.912 | 3.034 | 3.287 | 3.159 |
| 0 | 3.685 | 3.140 | 3.272 | 3.545 | 3.407 |
| 5 | 3.601 | 3.068 | 3.198 | 3.464 | 3.330 |
| 10 | 3.969 | 3.382 | 3.525 | 3.818 | 3.670 |
| 15 | 4.153 | 3.539 | 3.688 | 3.995 | 3.840 |
| 20 | 4.337 | 3.696 | 3.851 | 4.172 | 4.010 |
| 25 | 4.522 | 3.853 | 4.015 | 4.349 | 4.180 |
| 30 | 4.706 | 4.010 | 4.178 | 4.526 | 4.351 |
| 35 | 4.890 | 4.166 | 4.342 | 4.703 | 4.521 |

ДОДАТОК Г. МАТЕРІАЛИ ДО МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ

1. ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ ділянку між опорами будь-якого типу
- ☐ ділянку між анкерними опорами
- ☐ ділянку між проміжними опорами
- ☐ ділянку між анкерною та суміжною проміжною опорами
- ☐ ділянку між опорами анкерного типу, на якій встановлено проміжні опори

2. ДОВЖИНОЮ ПРОГОНУ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ відстань між суміжними опорами повітряної лінії
- ☐ горизонтальну проекцію прогону
- ☐ відстань між верхньою та нижньою точками провисання проводів
- ☐ відстань між точками підвішування проводів на суміжних опорах
- ☐ відстань між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та кривою провисання проводу у середині прогону

3. АНКЕРНИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ ділянку між опорами будь-якого типу
- ☐ ділянку між анкерними опорами
- ☐ ділянку між проміжними опорами
- ☐ ділянку між анкерною та суміжною проміжною опорами
- ☐ ділянку між опорами анкерного типу, на якій встановлено проміжні опори

4. АНКЕРОВАНОЮ ДІЛЯНКОЮ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ ділянку між опорами будь-якого типу
- ☐ ділянку між анкерними опорами
- ☐ ділянку між проміжними опорами
- ☐ ділянку між анкерною та суміжною проміжною опорами
- ☐ ділянку між опорами анкерного типу, на якій встановлено проміжні опори

5. СТІЛОЮ ПРОВИСАННЯ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ відстань між суміжними опорами повітряної лінії
- ☐ горизонтальну проекцію прогону
- ☐ відстань між верхньою та нижньою точками провисання проводів
- ☐ відстань між точками підвішування проводів на суміжних опорах
- ☐ відстань між прямою, яка поєднує точки закріплення проводів на суміжних опорах та кривою провисання проводу у середині прогону

6. ВИМОГУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЗАДОВОЛЬНЯЮТЬ

- ☐ вибором номінальної напруги лінії
- ☐ вибором ізоляційних підвісів
- ☐ вибором конструкції опори
- ☐ вибором перерізу алюмінієвої частини проводу
- ☐ вибором перерізу сталевих частин проводу
- ☐ вибором ступеню натягу проводів

7. ВИМОГУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЗАДОВОЛЬНЯЮТЬ

- ☐ вибором номінальної напруги лінії
- ☐ вибором ізоляційних підвісів
- ☐ вибором конструкції опори
- ☐ вибором перерізу алюмінієвої частини проводу
- ☐ вибором перерізу сталеві частини проводу
- ☐ вибором ступеню натягу проводів

8. ВИМОГУ ГАРАНТУВАННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЗАДОВОЛЬНЯЮТЬ

- ☐ вибором номінальної напруги лінії
- ☐ вибором ізоляційних підвісів
- ☐ вибором конструкції опори
- ☐ вибором перерізу алюмінієвої частини проводу
- ☐ вибором перерізу сталеві частини проводу
- ☐ вибором ступеню натягу проводів

9. ВИМОГУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЗАДОВОЛЬНЯЮТЬ

- ☐ вибором номінальної напруги лінії
- ☐ вибором ізоляційних підвісів
- ☐ вибором конструкції опори
- ☐ вибором перерізу алюмінієвої частини проводу
- ☐ вибором перерізу сталеві частини проводу
- ☐ вибором ступеню натягу проводів

10. ЗАЗНАЧТЕ ВИМОГИ, ЯКІ ВИСУВАЮТЬ ДО
КОНСТРУКЦІЇ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

- ☐ наявність сталевого осереддя
- ☐ достатня електрична провідність
- ☐ висока механічна міцність
- ☐ істотна реакція на зміну кліматичних навантажень та впливів

11. ЗАЗНАЧТЕ НЕДОЛІКИ МІДІ ЯК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ
ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

- ☐ недостатня електрична провідність
- ☐ недостатня механічна міцність
- ☐ дефіцитність матеріалу
- ☐ недостатня корозійна стійкість
- ☐ електрична нелінійність

12. ЗАЗНАЧТЕ НЕДОЛІКИ АЛЮМІНІЮ ЯК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ
ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОВОДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

- ☐ недостатня електрична провідність
- ☐ недостатня механічна міцність
- ☐ дефіцитність матеріалу
- ☐ недостатня корозійна стійкість
- ☐ електрична нелінійність

13. ЗАЗНАЧТЕ НЕДОЛІКИ СТАЛІ ЯК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

- ☐ недостатня електрична провідність
- ☐ недостатня механічна міцність
- ☐ дефіцитність матеріалу
- ☐ недостатня корозійна стійкість
- ☐ електрична нелінійність

14. РОЗРАХУНКОВИЙ ПЕРЕРІЗ СТАЛЕАЛЮМІНІЄВИХ ПРОВІДІВ ВИЗНАЧАЄТЬСЯ

- ☐ сумою перерізів проволочок, з яких звите сталеве осереддя проводу
- ☐ сумою перерізів проволочок, з яких звитий алюмінієвий шар проводу
- ☐ сумою перерізів всіх проволочок, з яких звитий провід

15. ЗАЗНАЧТЕ КЛІМАТИЧНІ ФАКТОРИ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ КОНСТРУКЦІЮ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ

- ☐ температура повітря
- ☐ вологість повітря
- ☐ опади у вигляді дощу та снігу
- ☐ натиск вітру
- ☐ відкладення ожеледі

**16. ЗАЗНАЧТЕ ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ЗНАЧЕННЯ
ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ**

- ☐ максимальна температура
- ☐ температура дощового періоду
- ☐ середньорічна температура
- ☐ температура утворення ожеледі
- ☐ температура галопування проводів

**17. ЗАЗНАЧТЕ ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ЗНАЧЕННЯ
НАВАНТАЖЕНЬ ВІД ВАГИ ОЖЕЛЕДІ**

- ☐ товщина стінки ожеледі
- ☐ об'єм циліндру відкладень ожеледі
- ☐ форма відкладень ожеледі
- ☐ вага ожеледі

**18. ЗАЗНАЧТЕ ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ЗНАЧЕННЯ ВІТРОВИХ
НАВАНТАЖЕНЬ**

- ☐ швидкісний натиск в експлуатаційному режимі
- ☐ швидкісний натиск в режимі грозового періоду
- ☐ швидкісний натиск в режимі галопування проводів
- ☐ швидкісний натиск в режимі максимальної ожеледі
- ☐ швидкісний натиск в режимі максимального вітру

19. ЗАЗНАЧТЕ ВИДИ КОЛИВАННЯ ПРОВОДІВ,
ОБУМОВЛЕНІ ДІЄЮ ВІТРУ

- ☐ вібрація
- ☐ галопування
- ☐ коронне галопування
- ☐ субколивання
- ☐ коливання після скидання ожеледі

20. ЗАЗНАЧТЕ ВИДИ КОЛИВАННЯ ПРОВОДІВ, НЕ
ПОВ'ЯЗАНІ З ДІЄЮ ВІТРУ

- ☐ вібрація
- ☐ галопування
- ☐ коронне галопування
- ☐ субколивання
- ☐ коливання після скидання ожеледі

21. ТЕМПЕРАТУРУ ЗА МАКСИМАЛЬНОГО ВІТРУ
ПРИЙМАЮТЬ

- ☐ +15 °C
- ☐ +70 °C
- ☐ таку саму, що й за максимальної ожеледі
- ☐ таку саму, що і в експлуатаційному режимі
- ☐ таку саму, що і в режимі грозового періоду

22. ЗАЗНАЧТЕ ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЯВИЩА, ЯКІ МАЮТЬ МІСЦЕ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОВІДІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

- ☐ пружне розтягування
- ☐ поздовжнє тяжіння
- ☐ асинхронна вібрація
- ☐ теплове здовження

23. ОДИНИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВІДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЦЕ

- ☐ навантаження на одну опору лінії
- ☐ навантаження на одиницю довжини лінії
- ☐ навантаження на одиницю перерізу проводу
- ☐ навантаження на одиницю довжини лінії, віднесене до розрахункового переізу
- ☐ навантаження на одиницю довжини, віднесене до перерізу сталевго осереддя

24. ПИТОМІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВІДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЦЕ

- ☐ навантаження на одну опору лінії
- ☐ навантаження на одиницю довжини лінії
- ☐ навантаження на одиницю перерізу проводу
- ☐ навантаження на одиницю довжини лінії, віднесене до розрахункового переізу
- ☐ навантаження на одиницю довжини, віднесене до перерізу сталевго осереддя

25. ДО ПОСТІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ
ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ навантаження від власної ваги проводу
- ☐ навантаження від ваги відкладень ожеледі
- ☐ навантаження від натиску вітру
- ☐ навантаження від вібрації проводів
- ☐ навантаження від натягу проводів

26. ДО ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ
ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ навантаження від власної ваги проводу
- ☐ навантаження від ваги відкладень ожеледі
- ☐ навантаження від натиску вітру
- ☐ навантаження від вібрації проводів
- ☐ навантаження від натягу проводів

27. ЗА ВІДСУТНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО НАГРІВАННЯ
ПРОВODІВ РОБОЧИМИ СТРУМАМИ ТЕМПЕРАТУРУ
ПРОВODУ В РЕЖИМІ МАКСИМАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
НАВАНТАЖЕНЬ ПРИЙМАЮТЬ

- ☐ +15 °C
- ☐ +70 °C
- ☐ таку саму, що й за максимальної ожеледі
- ☐ таку саму, що і в експлуатаційному режимі
- ☐ таку саму, що і в режимі грозового періоду

28. ДО КЛІМАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ навантаження від власної ваги проводу
- ☐ навантаження від ваги відкладень ожеледі
- ☐ навантаження від натиску вітру
- ☐ навантаження від вібрації проводів
- ☐ навантаження від натягу проводів

29. ДО ВЕРТИКАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ навантаження від власної ваги проводу
- ☐ навантаження від ваги відкладень ожеледі
- ☐ навантаження від натиску вітру
- ☐ навантаження від вібрації проводів
- ☐ навантаження від натягу проводів

30. ДО ГОРИЗОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОВОДИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ навантаження від власної ваги проводу
- ☐ навантаження від ваги відкладень ожеледі
- ☐ навантаження від натиску вітру
- ☐ навантаження від вібрації проводів
- ☐ навантаження від натягу проводів

31. КОЕФІЦІЄНТ НАДІЙНОСТІ ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ

- ☐ перерахунку кліматичних навантажень до розрахункових періодів повторюваності
- ☐ урахування вимог надійності механічної конструкції лінії
- ☐ визначення умов виникнення вібрації та галопування проводів

32. НОРМАТИВНІ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ВАГИ ОЖЕЛЕДІ ВИЗНАЧАЮТЬСЯ

- ☐ густиною льоду
- ☐ товщиною стінки ожеледі
- ☐ швидкісним натиском вітру
- ☐ формою ожеледі на проводах
- ☐ вібрацією та галопуванням проводів

33. ІЗ ЗБІЛЬШЕННЯМ ВИСОТИ РОЗТАШУВАННЯ ПРОВОДУ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ВАГИ ВІДКЛАДЕНЬ ОЖЕЛЕДІ

- ☐ збільшується
- ☐ зменшується
- ☐ не змінюється

34. ІЗ ЗБІЛЬШЕННЯМ ДІАМЕТРУ ПРОВОДУ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ВАГИ ВІДКЛАДЕНЬ ОЖЕЛЕДІ

- ☐ збільшується
- ☐ зменшується
- ☐ не змінюється

35. ІЗ ЗБІЛЬШЕННЯМ ВИСОТИ РОЗТАШУВАННЯ ПРОВОДУ НАВАНТАЖЕННЯ ВІД НАТИСКУ ВІТРУ

- ☐ збільшується
- ☐ зменшується
- ☐ не змінюється

36. НАВАНТАЖЕННЯ ВІД НАТИСКУ ВІТРУ ПРОПОРЦІЙНІ

- ☐ швидкості вітру
- ☐ швидкісному натиску вітру
- ☐ квадрату швидкісного натиску вітру
- ☐ товщині стінки ожеледі

37. ЗАЗНАЧТЕ МОЖЛИВІ РЕЖИМИ МАКСИМАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

- ☐ максимальної стріли провисання
- ☐ максимальної ожеледі
- ☐ максимального вітру
- ☐ мінімальних температур
- ☐ вітру під час ожеледі

38. КРИВУ ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ В ПРОГОНАХ ДОВЖИНОЮ ПОНАД 800 м ПРЕДСТАВЛЯЮТЬ

- ☐ рівнянням параболи
- ☐ рівнянням гіперболи
- ☐ рівнянням гнучкої нитки
- ☐ рівнянням ланцюгової лінії

39. КРИВУ ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ В ПРОГОНАХ
ДОВЖИНОЮ ДО 800 м ПРЕДСТАВЛЯЮТЬ

- ☐ рівнянням параболи
- ☐ рівнянням гіперболи
- ☐ рівнянням гнучкої нитки
- ☐ рівнянням ланцюгової лінії

40. В ЯКІЙ ТОЧЦІ ТЯЖІННЯ ПРОВОДУ БІЛЬШЕ

- ☐ тяжіння у всіх точках проводу однакове
- ☐ в середині прогону
- ☐ в нижній точці провисання проводу
- ☐ в точці закріплення проводу на опорі

41. В ПРОГОНАХ ДО 800 м ДОВЖИНА ПРОВОДУ
ПЕРЕВИЩУЄ ДОВЖИНУ ПРОГОНУ

- ☐ не більше, ніж на 0,5%
- ☐ не більше, ніж на 5%
- ☐ не перевищує
- ☐ в точці закріплення проводу на опорі

42. ЗА РІВНЯННЯМ СТАНУ ПРОВОДУ У ПРОГОНІ
ВИЗНАЧАЮТЬ

- ☐ напруження проводу
- ☐ стрілу провисання проводу
- ☐ довжину проводу у прогоні
- ☐ висоту розташування центру мас проводу
- ☐ редуковане тяжіння проводу

43. ЗАЗНАЧТЕ ПРАВИЛЬНИЙ ВИРАЗ РІВНЯННЯ СТАНУ ПРОВОДУ У ПРОГОНІ

☐ $\sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} = \sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} - \alpha E(t_0 - t)$

☐ $\sigma + \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 + \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} + \alpha E(t + t_0)$

☐ $\sigma - \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} = \sigma_0 - \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} - \alpha E(t - t_0)$

☐ $\sigma_0 + \frac{\gamma_0^2 El^2}{24\sigma_0^2} = \sigma + \frac{\gamma^2 El^2}{24\sigma^2} + \alpha E(t_0 + t)$

44. РОЗРАХУНОК ПРОВОДІВ ТА ТРОСІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ВИКОНУЮТЬ ЗА МЕТОДОМ

- ☐ граничних станів
- ☐ руйнівних навантажень
- ☐ допустимих напружень

45. У ПЕРШОМУ КРИТИЧНОМУ ПРОГОНІ МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ДОСЯГАЮТЬ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ

- ☐ в режимах максимальної ожеледі та максимального вітру
- ☐ в режимах максимальних навантажень та експлуатаційному
- ☐ в режимах мінімальних температур та в експлуатаційному
- ☐ в режимах максимальних навантажень та мінімальних температур
- ☐ в режимах максимальних навантажень та максимальних температур

46. У ДРУГОМУ КРИТИЧНОМУ ПРОГОНІ МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ДОСЯГАЮТЬ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ

- ☐ в режимах максимальної ожеледі та максимального вітру
- ☐ в режимах максимальних навантажень та експлуатаційному
- ☐ в режимах мінімальних температур та в експлуатаційному
- ☐ в режимах максимальних навантажень та мінімальних температур
- ☐ в режимах максимальних навантажень та максимальних температур

47. У ТРЕТЬОМУ КРИТИЧНОМУ ПРОГОНІ МЕХАНІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ ДОСЯГАЮТЬ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ ЗНАЧЕНЬ

- ☐ в режимах максимальної ожеледі та максимального вітру
- ☐ в режимах максимальних навантажень та експлуатаційному
- ☐ в режимах мінімальних температур та в експлуатаційному
- ☐ в режимах максимальних навантажень та мінімальних температур
- ☐ в режимах максимальних навантажень та максимальних температур

48. ЗА КРИТИЧНИМИ ПРОГОНАМИ ВИЗНАЧАЮТЬ

- ☐ режим максимальної стріли провисання
- ☐ вихідний кліматичний режим
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ режим максимального вітру

49. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ МЕНШИМ ЗА ПЕРШИЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

50. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ БІЛЬШИМ ЗА ПЕРШИЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

51. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ МЕНШИМ ЗА ДРУГИЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

52. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ БІЛЬШИМ ЗА ДРУГИЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

53. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ МЕНШИМ ЗА ТРЕТІЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

54. ЯКЩО ФАКТИЧНИЙ ПРОГІН ВІЯВЛЯЄТЬСЯ БІЛЬШИМ ЗА ТРЕТІЙ КРИТИЧНИЙ ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ експлуатаційний режим

55. ЗАЗНАЧНЕ РОЗРАХУНКОВІ КЛІМАТИЧНІ РЕЖИМИ

- ☐ режим дощового періоду
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим вібрації та галопування проводів
- ☐ режим нагрівання проводів струмами навантаження
- ☐ режим мінімальних температур

56. ЗАЗНАЧНЕ КЛІМАТИЧНІ РЕЖИМИ, ЯКІ МОЖУТЬ ВИСТУПАТИ ВИХІДНИМИ

- ☐ режим грозового періоду
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим вібрації та галопування проводів
- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ режим максимального вітру

57. РЕЖИМ МІНІМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

58. РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

59. РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОГО ВІТРУ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

60. ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РЕЖИМ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

61. РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОЇ ОЖЕЛЕДІ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

62. РЕЖИМ ВІТРУ ПІД ЧАС ОЖЕЛЕДІ РОЗРАХОВУЮТЬ ДЛЯ КОНТРОЛЮ

- ☐ габаритних відстаней
- ☐ ізоляційних проміжків
- ☐ пропускної здатності лінії
- ☐ механічного тяжіння

63. ГРОЗОЗАХИСНИЙ ТРОС РОЗРАХОВУЮТЬ ЗА УМОВАМИ

- ☐ режиму мактимальних температур
- ☐ режиму максимального вітру
- ☐ режиму грозового періоду
- ☐ режиму вітру під час ожеледі
- ☐ експлуатаційного режиму

64. ЗА КРИТИЧНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ВИЗНАЧАЮТЬ

- ☐ вихідний кліматичний режим
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ режим максимальної стріли провисання
- ☐ режим максимального вітру

65. РЕДУКОВАНИМ ТЯЖІННЯМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ тяжіння в нижній точці провисання проводу
- ☐ усталене тяжіння у прогоні, суміжному із аварійним
- ☐ усталене тяжіння в проводі після обриву
- ☐ тяжіння, обумовлене переміщенням точки закріплення проводу

66. В ЯКОМУ З ДВОХ ПРОГОНІВ КОЕФІЦІЄНТ РЕДУКЦІЇ БІЛЬШИЙ

- ☐ в прогоні із більшою довжиною ізоляційного підвісу
- ☐ в прогоні із меншою довжиною ізоляційного підвісу
- ☐ коефіцієнт редукції не залежить від довжини ізоляційного підвісу

67. В ЯКОМУ З ДВОХ ПРОГОНІВ КОЕФІЦІЄНТ РЕДУКЦІЇ БІЛЬШИЙ

- ☐ в прогоні більшої довжини
- ☐ в прогоні меншої довжини
- ☐ коефіцієнт редукції від довжини прогону не залежить

68. КОЕФІЦІЄНТ РЕДУКЦІЇ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

- ☐ завжди менший за одиницю
- ☐ завжди більший за одиницю
- ☐ може бути більшим або меншим одиниці

69. МІНІМАЛЬНА ТЕМПЕРАТУРА В РАЙОНІ ТРАСИ ЛІНІЇ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, СЕРЕДНЬОРІЧНА $-0\text{ }^{\circ}\text{C}$, МАКСИМАЛЬНА $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. КРИТИЧНА ТЕМПЕРАТУРА $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$. ВИЗНАЧИТИ РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОЇ СТІЛИ ПРОВИСАННЯ ПРОВОДУ

- ☐ режим максимальної ожеледі
- ☐ режим максимальної температури
- ☐ експлуатаційний режим

70. СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ КРИТИЧНИМИ ПРОГОНАМИ СТАНОВИТЬ: $l_{1\text{кр}}$, $l_{3\text{кр}}$ - уявні числа, $l_{2\text{кр}} = 200\text{ м}$. ДОВЖИНА ЗВЕДЕНОГО ПРОГОНУ $l = 200\text{ м}$. ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ режим грозового періоду

71. СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ КРИТИЧНИМИ ПРОГОНАМИ СТАНОВИТЬ: $l_{1кр} = 180$ м, $l_{2кр} = 200$ м, $l_{3кр}$ - уявне число. ДОВЖИНА ЗВЕДЕНОГО ПРОГОНУ $l = 190$ м. ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ режим грозового періоду

72. СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ КРИТИЧНИМИ ПРОГОНАМИ СТАНОВИТЬ: $l_{1кр} = 180$ м, $l_{2кр} = 200$ м, $l_{3кр} = 220$ м. ДОВЖИНА ЗВЕДЕНОГО ПРОГОНУ $l = 190$ м. ЗА ВИХІДНИЙ РЕЖИМ СЛІД ПРИЙНЯТИ

- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим максимальних навантажень
- ☐ режим грозового періоду

73. СУМАРНІ ОДИНИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ЛІНІЇ СКЛАДАЮТЬ: ВІД ВАГИ ПРОВОДУ, ВКРИТОГО ОЖЕЛЕДДЮ $0,5$ Н/М, ВІД ВАГИ ПРОВОДУ ТА НАТИСКУ ВІТРУ $0,7$ Н/М, ВІД ВАГИ ПРОВОДУ ТА НАТИСКУ ВІТРУ ПІД ЧАС ОЖЕЛЕДІ $0,75$ Н/М. ВИЗНАЧИТИ РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимального вітру
- ☐ режим максимальної ожеледі

74. СУМАРНІ ПИТОМІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОВОДИ ЛІНІЇ СКЛАДАЮТЬ: ВІД ВАГИ ПРОВОДУ, ВКРИТОГО ОЖЕЛЕДДЮ $35 \cdot 10^{-3}$ МПА/М, ВІД ВАГИ ПРОВОДУ ТА НАТИСКУ ВІТРУ $80 \cdot 10^{-3}$ МПА/М, ВІД ВАГИ ПРОВОДУ ТА НАТИСКУ ВІТРУ ПІД ЧАС ОЖЕЛЕДІ $60 \cdot 10^{-3}$ МПА/М. ВИЗНАЧИТИ РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

- ☐ режим мінімальних температур
- ☐ експлуатаційний режим
- ☐ режим вітру під час ожеледі
- ☐ режим максимального вітру
- ☐ режим максимальної ожеледі

75. МІНІМАЛЬНИЙ ШАБЛОН БУДУЮТЬ ДЛЯ РЕЖИМУ

- ☐ найбільшої стріли провисання
- ☐ найбільших навантажень
- ☐ мінімальних температур
- ☐ максимальних температур
- ☐ максимальної ожеледі

76. ЗАЗНАЧТЕ МОЖЛИВІ ЗАХОДИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ВИРИВАННЯ ОПОР

- ☐ заміна нижньої опори на анкерну
- ☐ використання відтяжок
- ☐ встановлення підвищеної нижньої опори
- ☐ встановлення занижених верхніх опор

77. МОНТАЖНІ ГРАФІКИ ЯВЛЯЮТЬ СОБОЮ

- ☐ залежність стріли провисання від температури
- ☐ залежність тяжіння від температури
- ☐ залежність тяжіння від стріли провисання
- ☐ залежність довжини прогону від температури

78. ЗАЗНАЧТЕ ВЕРТИКАЛЬНІ НАВАТАЖЕННЯ НА ОПОРИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

- ☐ власна вага опори
- ☐ тяжіння проводів та тросів
- ☐ монтажні навантаження
- ☐ вага проводів та тросів
- ☐ сейсмічні навантаження
- ☐ натиск вітру на проводи та троси

79. ЗАЗНАЧТЕ ГОРИЗОНТАЛЬНІ НАВАТАЖЕННЯ НА ОПОРИ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ

- ☐ власна вага опори
- ☐ тяжіння проводів та тросів
- ☐ монтажні навантаження
- ☐ вага проводів та тросів
- ☐ сейсмічні навантаження
- ☐ натиск вітру на проводи та троси

80. ДО ЛІНІЙНОЇ АРМАТУРИ ВІДНОСЯТЬ

- ☐ затискачі
- ☐ траверси
- ☐ розпорки
- ☐ фундаменти
- ☐ віброгасники

81. РОЗРАХУНОК ПЕРЕХОДІВ ПОЛЯГАЄ У КОНТРОЛІ

- ☐ допустимості габаритів
- ☐ допустимості напруження проводу
- ☐ допустимості стріл провисання

82. ПЕРЕХОДИ ЧЕРЕЗ АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ РОЗРАХОВУЮТЬ

- ☐ для режиму максимальної ожеледі
- ☐ для режиму максимальних температур
- ☐ для режиму грозового періоду
- ☐ для режиму нагрівання проводу в режимі максимальних навантажень

83. ПЕРЕХОДИ ЧЕРЕЗ ЕЛЕКТРИФІКОВАНІ ЗАЛІЗНИЦІ РОЗРАХОВУЮТЬ

- ☐ для режиму максимальної ожеледі
- ☐ для режиму максимальних температур
- ☐ для режиму грозового періоду
- ☐ для режиму нагрівання проводу в режимі максимальних навантажень
- ☐ для експлуатаційного режиму
- ☐ для експлуатаційного режиму

84. ПЕРЕХРЕЩЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ МІЖ СОБОЮ РОЗРАХОВУЮТЬ

- ☐ для режиму максимальної ожеледі
- ☐ для режиму максимальних температур
- ☐ для режиму грозового періоду
- ☐ для режиму нагрівання проводу в режимі максимальних навантажень
- ☐ для експлуатаційного режиму

85. ЗАЗНАЧТЕ КІЛЬКІСТЬ КРИВИХ РОЗБИВНОГО ШАБЛОНУ

- ☐ одна
- ☐ дві
- ☐ три
- ☐ чотири

86. ЗАЗНАЧТЕ КІЛЬКІСТЬ КРИВИХ МІНІМАЛЬНОГО ШАБЛОНУ

- ☐ одна
- ☐ дві
- ☐ три
- ☐ чотири

87. ГАБАРИТНИЙ ПРОГІН ОБУМОВЛЕНИЙ

- ☐ максимально допустимим горизонтальним навантаженням на опору
- ☐ максимально допустимим навантаженням від тяжіння проводу
- ☐ максимально допустимим вертикальним навантаженням на опору
- ☐ нормованими габаритними відстанями

88. ГАБАРИТНИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ найбільшу допустиму відстань між суміжними опорами на рівній місцевості
- ☐ найбільшу допустиму відстань між нижніми точками провисання у суміжних прогонах
- ☐ найбільшу допустиму відстань між серединами суміжних прогонів
- ☐ найбільшу допустиму відстань між анкерними опорами

89. ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИМ ВІТРОВИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ найбільшу допустиму відстань між суміжними опорами на рівній місцевості
- ☐ найбільшу допустиму відстань між нижніми точками провисання у суміжних прогонах
- ☐ найбільшу допустиму відстань між серединами суміжних прогонів
- ☐ найбільшу допустиму відстань між анкерними опорами

90. ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИМ ВАГОВИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ найбільшу допустиму відстань між суміжними опорами на рівній місцевості
- ☐ найбільшу допустиму відстань між нижніми точками провисання у суміжних прогонах
- ☐ найбільшу допустиму відстань між серединами суміжних прогонів
- ☐ найбільшу допустиму відстань між анкерними опорами

91. ВІТРОВИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ відстань між суміжними опорами на ідеально рівній місцевості
- ☐ відстань між нижніми точками провисання у суміжних прогонах
- ☐ відстань між серединами суміжних прогонів
- ☐ відстань між анкерними опорами

92. ВАГОВИМ ПРОГОНОМ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ відстань між суміжними опорами на ідеально рівній місцевості
- ☐ відстань між нижніми точками провисання у суміжних прогонах
- ☐ відстань між серединами суміжних прогонів
- ☐ відстань між анкерними опорами

93. ВАГОВИЙ ПРОГІН ОБУМОВЛЕНИЙ

- ☐ максимально допустимим горизонтальним навантаженням на опору
- ☐ максимально допустимим навантаженням від тяжіння проводу
- ☐ максимально допустимим вертикальним навантаженням на опору
- ☐ нормованими габаритними відстанями

94. ВІТРОВИЙ ПРОГІН ОБУМОВЛЕНИЙ

- ☐ максимально допустимим горизонтальним навантаженням на опору
- ☐ максимально допустимим навантаженням від тяжіння проводу
- ☐ максимально допустимим вертикальним навантаженням на опору
- ☐ нормованими габаритними відстанями

95. РОЗТАШУВАННЯ ОПОР ВЗДОВЖ ТРАСИ ЛІНІЇ ЗДІЙСНЮЮТЬ

- ☐ за умовами габаритних відстаней
- ☐ за умовами вітрових прогонів
- ☐ за умовами вагових прогонів

96. РОЗБИВНИЙ ШАБЛОН ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ

- ☐ формування монтажних графіків та таблиць
- ☐ перевірки опор на виривання
- ☐ визначення режиму максимальної стріли провисання
- ☐ розташування опор за профілем траси лінії

97. РОЗБИВНИЙ ШАБЛОН БУДУЮТЬ ДЛЯ РЕЖИМУ

- ☐ найбільшої стріли провисання
- ☐ найбільших навантажень
- ☐ мінімальної температури
- ☐ максимальної температури
- ☐ максимальної ожеледі

98. НИЖНЮ КРИВУ РОЗБИВНОГО ШАБЛОНУ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ монтажна крива
- ☐ земляна крива
- ☐ габаритна крива
- ☐ крива провисання проводу
- ☐ розбивна крива

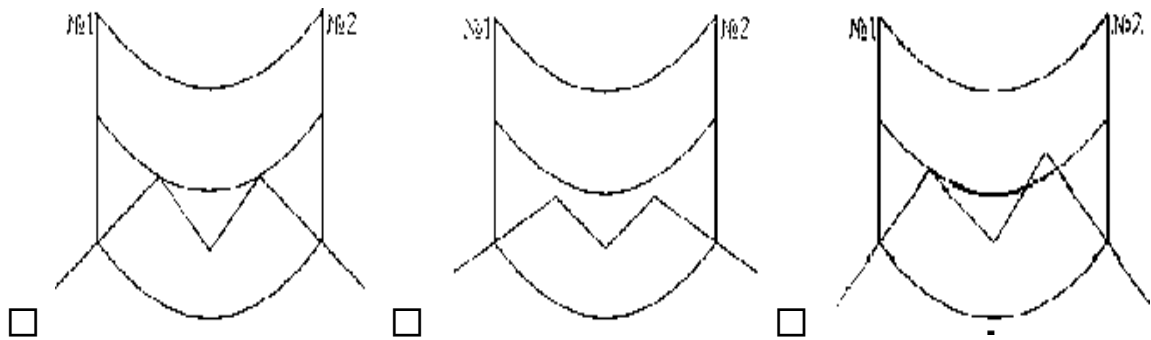
99. СЕРЕДНЮ КРИВУ РОЗБИВНОГО ШАБЛОНУ НАЗИВАЮТЬ

- ☐ монтажна крива
- ☐ земляна крива
- ☐ габаритна крива
- ☐ крива провисання проводу
- ☐ розбивна крива

100. ВЕРХНЮ КРИВУ РОЗБИВНОГО ШАБЛОНУ
НАЗИВАЮТЬ

- ☐ монтажна крива
- ☐ земляна крива
- ☐ габаритна крива
- ☐ крива провисання проводу
- ☐ розбивна крива

101. ЗАЗНАЧТЕ РИСУНКИ, ДЕ РОЗТАШУВАННЯ ОПОР
ВИКОНАНО ІЗ ПОРУШЕННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВИМОГ



- ☐ на жодному рисунку технологічні вимоги не порушені

102. МІНІМАЛЬНИЙ ШАБЛОН ПРИЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ

- ☐ формування монтажних графіків та таблиць
- ☐ перевірки опор на виривання
- ☐ визначення режиму максимальної стріли провисання
- ☐ розташування опор за профілем траси лінії

| | |
|---|-----|
| ПЕРЕДМОВА | 3 |
| СКОРОЧЕННЯ ТА ПОЗНАЧЕННЯ | 5 |
| Розділ 1. КОНСТРУКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ | 7 |
| 1.1. Загальні відомості про конструктивне виконання повітряних ліній електропередавання | 7 |
| 1.2. Проводи повітряних ліній електропередавання | 12 |
| 1.3. Опори повітряних ліній електропередавання | 24 |
| 1.4. Ізолятори та лінійна арматура повітряних ліній електропередавання | 35 |
| 1.5. Характеристика кліматичних умов експлуатації повітряних ліній | 44 |
| 1.6. Коливання проводів повітряних ліній | 51 |
| Розділ 2. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОВОДІВ ТА ТРОСІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ | 58 |
| 2.1. Фізико-механічні властивості проводів повітряних ліній електропередавання | 58 |
| 2.2. Крива провисання проводу у прогоні | 70 |
| 2.3. Стріла провисання проводу у прогоні | 78 |
| 2.4. Тяжіння в матеріалі проводу | 85 |
| 2.5. Довжина проводу у прогоні | 92 |
| 2.6. Висота розташування центру мас проводу у прогоні | 95 |
| 2.7. Стан проводу, який зазнає горизонтального вітрового навантаження | 98 |
| Розділ 3. МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ | 106 |
| 3.1. Принципи механічних розрахунків конструкцій повітряних ліній | 106 |
| 3.2. Механічні навантаження на проводи та троси повітряних ліній | 112 |
| 3.3. Рівняння стану проводу у прогоні | 126 |
| 3.4. Зведений прогін | 130 |
| 3.5. Критичні прогони | 134 |
| 3.6. Критична температура | 146 |
| 3.7. Систематичний розрахунок проводів повітряної лінії | 148 |
| 3.8. Розрахунок грозозахисного троса | 152 |
| 3.9. Механічний розрахунок ізоляційних підвісів | 155 |

| | |
|--|-----|
| 3.10. Захист повітряної лінії від вібрації | 161 |
| 3.11. Навантаження на опори повітряної лінії | 166 |
| Розділ 4. АНАЛІЗ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ | 171 |
| 4.1. Загальна характеристика аварійних режимів повітряних ліній електропередавання | 171 |
| 4.2. Розрахунок аварійного режиму лінії у разі обриву проводу у другому прогоні від анкерної опори | 175 |
| 4.3. Загальний випадок визначення редукованого тяжіння | 179 |
| Розділ 5. ПРОЕКТНЕ РОЗТАШУВАННЯ ОПОР ЗА ПРОФІЛЕМ ТРАСИ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ | 183 |
| 5.1. Поздовжній профіль траси повітряної лінії | 183 |
| 5.2. Визначення місць розташування опор за профілем траси | 185 |
| 5.3. Перевірка опор на виривання | 196 |
| 5.4. Розрахунки переходів | 200 |
| 5.5. Розрахунок монтажних стріл провисання проводу | 202 |
| 5.6. Системи автоматизованого проектування повітряних ліній | 208 |
| ГЛОСАРІЙ | 213 |
| ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК | 227 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ | 230 |
| ДОДАТКИ | 235 |
| Додаток А. Довідникові матеріали | 235 |
| Додаток Б. Кліматичне районування території України | 245 |
| Додаток В. Типові задачі до практичних занять | 255 |
| Додаток Г. Матеріали до модульного контролю | 302 |